



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB  
IG/ IB/ IQ/ FACE-ECO/ CDS  
CURSO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS

**ANÁLISE SAZONAL DA RELAÇÃO ENTRE SEQUESTRO  
FLORESTAL DE CARBONO E ILHAS DE CALOR URBANAS NAS  
METRÓPOLES DE SÃO PAULO, RIO DE JANEIRO, BELO  
HORIZONTE E BRASÍLIA**

KHALIL ALI GANEM  
MARCELI TERRA DE OLIVEIRA

BRASÍLIA – DF  
DEZEMBRO/2014

MARCELI TERRA DE OLIVEIRA

KHALIL ALI GANEM

**ANÁLISE SAZONAL DA RELAÇÃO ENTRE SEQUESTRO FLORESTAL DE  
CARBONO E ILHAS DE CALOR URBANAS NAS METRÓPOLES DE SÃO  
PAULO, RIO DE JANEIRO, BELO HORIZONTE E BRASÍLIA**

Monografia apresentada ao curso de graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Brasília como requisito parcial para obtenção de grau de bacharel em Ciências Ambientais, sob orientação do professor Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista.

BRASÍLIA – DF  
DEZEMBRO/2014

TERRA-OLIVEIRA, Marcell. GANEM, Khalil Ali.

Análise Sazonal da Relação entre Sequestro Florestal de Carbono e Ilhas de Calor Urbanas nas Metrópoles de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília.

Orientação: Gustavo Macedo de Mello Baptista.

76 páginas.

Projeto final em ciências ambientais – Consórcio IG/ IB/ IQ/ FACE-ECO/ CDS – Universidade de Brasília.

Brasília – DF, 2014.

1. CO<sub>2</sub>flux – 2. Ilhas de Calor Urbanas – 3. Sequestro de Carbono – 4. Landsat 8 – 5. Temperatura de Brilho – 6. Coeficiente de Kendall.

**ANÁLISE SAZONAL DA RELAÇÃO ENTRE SEQUESTRO FLORESTAL DE  
CARBONO E ILHAS DE CALOR URBANAS NAS METRÓPOLES DE SÃO  
PAULO, RIO DE JANEIRO, BELO HORIZONTE E BRASÍLIA**

Marceli Terra de Oliveira

Khalil Ali Ganem

Prof. Orientador: Gustavo Macedo de Mello Baptista

Brasília – DF, 11 de dezembro de 2014.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista (Orientador)  
Instituto de Geociências da Universidade de Brasília

---

Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha (Avaliador 1)  
Instituto de Geociências da Universidade de Brasília

---

Prof. Dr. Pedro Henrique Zuchi da Conceição (Avaliador 2)  
Instituto de Economia da Universidade de Brasília

**Dedicamos esse trabalho aos nossos familiares e amigos,  
que estiveram ao nosso lado durante todo o tempo.**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente ao nosso professor, amigo e pai acadêmico Gustavo Baptista pela confiança creditada e pelos bons momentos vividos durante esses anos de trabalho.

Aos nossos familiares e amigos pelo apoio, paciência e compreensão durante todos os momentos de dificuldade, inclusive quando não pudemos estar presentes nas atividades sociais.

Ao professor Luciano Cunha por abrir nossos olhos em tantas circunstâncias, inclusive quanto às prosopopeias flácidas para acalentar bovinos.

Ao coordenador do curso de Ciências Ambientais, Pedro Zuchi, por abraçar a causa do nosso curso e nos fazer representar tão bem.

Aos nossos colegas do PIBIC pelas trocas de experiência e descontração.

Aos queridos Heloise, Felipe (*Science bro*) e Jack pelo carinho, compreensão e por me tornar uma pessoa melhor a cada dia.

A Caroline, Chico, Ohanna, Millena e Isabella pelo suporte, incentivo e por sempre acreditarem em mim, estando ao meu lado em todos os instantes da minha vida.

A nossa amiga Lilian por todo o carinho e apoio durante essa etapa.

## RESUMO

O presente trabalho foi realizado em quatro metrópoles brasileiras, sendo elas São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília. Por meio dos dados do sensor OLI do Landsat 8 foram obtidos dados do índice CO<sub>2</sub>flux, proposto por Rahman et al. (2000), o qual detecta o sequestro florestal de carbono por meio da integração entre os índices espectrais NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (ROUSE et al., 1973) e PRI – Índice de Reflectância Fotoquímica (GAMON et al., 1997). Posteriormente utilizou-se os dados do sensor TIRS do mesmo satélite, o qual conta com duas bandas na faixa do infravermelho termal, que podem ser calibradas para obtenção da temperatura de brilho (WUKELIC et al., 1989). Esses dados dos dois imageadores do Landsat 8 permitiram que fosse feita uma análise da interferência da sazonalidade no sequestro florestal de carbono, bem como na variação da temperatura de superfície para as áreas de estudo, para que, ao final, fosse identificada a possível relação entre essas duas variáveis (sequestro de carbono e temperatura). De modo geral, os resultados demonstraram uma ampla variação do sequestro florestal de carbono e da temperatura ao se fazer uma comparação entre áreas urbanizadas e não urbanizadas para as quatro cidades, sendo que a relação estabelecida entre ambas as variáveis se apresentou de forma inversa. As cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, respectivamente, apresentaram maiores registros de temperatura e menor variação do sequestro de carbono em função da sazonalidade. A diferença entre ambas as variáveis para a cidade de Belo Horizonte foi mínima em função da sazonalidade. Já para Brasília, a sazonalidade demonstrou ter uma forte influência, especialmente no comportamento do sequestro de carbono. Ao final, comprovou-se, por meio do coeficiente de correlação de Kendall haver uma relação inversa entre o CO<sub>2</sub>flux e a temperatura, fato esse devido a variação sazonal do balanço de radiação solar recebido e à capacidade fotossintética florestal.

**Palavras-chave:** CO<sub>2</sub>flux; Ilhas de Calor Urbanas; Sequestro de Carbono; Landsat 8; Temperatura de Brilho; Coeficiente de Kendall.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - <b>Ciclo Global do Carbono</b> .....	15
Figura 2 - <b>Variações entre as temperaturas de superfície e do ar</b> .....	21
Figura 3 - <b>Albedos de superfícies diversas</b> .....	22
Figura 4 - <b>O Espectro Eletromagnético e seus respectivos comprimentos de onda, dados em nanômetros</b> .....	23
Figura 5 - <b>Influência da Atmosfera na Radiação Eletromagnética</b> .....	24
Figura 6 - <b>Obtenção de Imagens por Sensoriamento Remoto</b> .....	25
Figura 7 - <b>Linha do Tempo do Programa Landsat</b> .....	25
Figura 8 - <b>Comparação das bandas do Landsat 8 e do Landsat 7 em função dos intervalos de comprimento de onda</b> .....	26
Figura 9 - <b>Curvas Espectrais de Diferentes Alvos</b> .....	27
Figura 10 - <b>Demonstração das Operações Aritméticas Validando Pixel a Pixel</b> .....	28
Figura 11 - <b>Localização das Áreas de Estudo</b> .....	33
Figura 12 - <b>Fluxograma dos métodos aplicados</b> .....	38
Figura 13 - <b>Dados Pluviométricos de 2013 e 2014, respectivamente, das cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília</b> .....	38
Figura 14 - <b>Fluxograma para a aplicação de índices</b> .....	44
Figura 15 - <b>NDVI, sPRI, CO<sub>2</sub>flux e Temperatura de Brilho da cidade de São Paulo</b> .....	47
Figura 16 - <b>NDVI, sPRI, CO<sub>2</sub>flux e Temperatura de Brilho da cidade de Rio de Janeiro</b> .....	48
Figura 17 - <b>NDVI, sPRI, CO<sub>2</sub>flux e Temperatura de Brilho da cidade de BH</b> .....	49
Figura 18 - <b>NDVI, sPRI, CO<sub>2</sub>flux e Temperatura de Brilho da cidade de Brasília</b> .....	50
Figura 19 - <b>Transectos aplicados na imagem de São Paulo</b> .....	51
Figura 20 - <b>Gráfico demonstrando a variação do sequestro de carbono em função da sazonalidade na cidade de São Paulo</b> .....	52
Figura 21 - <b>Gráfico demonstrando a variação da temperatura em função da sazonalidade na cidade de São Paulo</b> .....	52
Figura 22 - <b>Gráficos demonstrando a relação entre CO<sub>2</sub>flux e temperatura da cidade de São Paulo para as estações seca e úmida</b> .....	52
Figura 23 - <b>Transectos aplicados na imagem do Rio de Janeiro</b> .....	55
Figura 24 - <b>Gráfico demonstrando a variação do sequestro de carbono em função da sazonalidade na cidade do Rio de Janeiro</b> .....	55
Figura 25 - <b>Gráfico demonstrando a variação da temperatura em função da sazonalidade na cidade do Rio de Janeiro</b> .....	55
Figura 26 - <b>Gráficos demonstrando a relação entre CO<sub>2</sub>flux e temperatura da cidade do Rio de Janeiro para as estações seca e úmida</b> .....	56



Figura 27 - Transectos aplicados na imagem de Belo Horizonte.....	58
Figura 28 - Gráfico demonstrando a variação do sequestro de carbono em função da sazonalidade na cidade de Belo Horizonte .....	58
Figura 29 - Gráfico demonstrando a variação da temperatura em função da sazonalidade na cidade de Belo Horizonte .....	58
Figura 30 - Chuva Acumulada em 24 horas na cidade de Belo Horizonte no mês de abril de 2014 .....	59
Figura 31 - Gráficos demonstrando a relação entre CO <sub>2</sub> flux e temperatura da cidade de Belo Horizonte para as estações seca e úmida.....	60
Figura 32 - Transectos aplicados na imagem de Brasília .....	62
Figura 33 - Gráfico demonstrando a variação do sequestro de carbono em função da sazonalidade na cidade de Brasília.....	62
Figura 34 - Gráfico demonstrando a variação da temperatura em função da sazonalidade na cidade de Brasília.....	62
Figura 35 - Gráficos demonstrando a relação entre CO <sub>2</sub> flux e temperatura da cidade de Brasília para as estações seca e úmida .....	63
Figura 36 - Variação de temperatura para as quatro cidades (Fatiamento).....	66
Figura 37 - Efeito da inclinação do eixo terrestre para a radiação recebida nas estações de inverno (Afélio) e verão (Periélio).....	68
Figura 38 - Telhado Verde na cidade de Stuttgart, Alemanha .....	69

## ÍNDICE DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - <b>Bandas do sensor OLI do Landsat 8, seus comprimentos de onda e resolução</b> .....	26
Quadro 2 - <b>Bandas do sensor TIRS do Landsat 8, seus comprimentos de onda e resolução</b> .....	26
Tabela 1 - <b>Definição das cidades e datas das imagens de satélite coletadas</b> .....	41
Tabela 2 - <b>Avaliação Qualitativa da Correlação</b> .....	46
Tabela 3 - <b>Resultados do teste de hipótese para a cidade de São Paulo</b> .....	54
Tabela 4 - <b>Resultados do coeficiente de correlação de Kendall para a cidade de São Paulo e suas estações</b> .....	54
Tabela 5 - <b>Resultados do teste de hipótese para a cidade do Rio de Janeiro</b> .....	57
Tabela 6 - <b>Resultados do coeficiente de correlação de Kendall para a cidade do Rio de Janeiro e suas estações</b> .....	57
Tabela 7 - <b>Resultados do teste de hipótese para a cidade de Belo Horizonte</b> .....	61
Tabela 8 - <b>Resultados do coeficiente de correlação de Kendall para a cidade de Belo Horizonte e suas estações</b> .....	61
Tabela 9 - <b>Resultados do teste de hipótese para a cidade de Brasília</b> .....	64
Tabela 10 - <b>Resultados do coeficiente de correlação de Kendall para a cidade de Brasília e suas estações</b> .....	64
Tabela 11 - <b>Variação de CO<sub>2</sub>flux e temperatura em função da sazonalidade, na faixa de pixels abrangida pelos transectos</b> .....	65

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Referencial Teórico .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>O Elemento Carbono e o Ciclo do Carbono .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Carbono na Atmosfera .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3</b>	<b>Sequestro Florestal de Carbono .....</b>	<b>17</b>
<b>2.4</b>	<b>Ilhas de Calor Urbanas.....</b>	<b>18</b>
<b>2.5</b>	<b>Albedo.....</b>	<b>21</b>
<b>2.6</b>	<b>Sensoriamento Remoto .....</b>	<b>22</b>
	2.6.1 Índices Espectrais .....	28
<b>3</b>	<b>Área de Estudo .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>São Paulo.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Rio de Janeiro.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>Belo Horizonte.....</b>	<b>35</b>
<b>3.4</b>	<b>Brasília.....</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>Material e Métodos .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1</b>	<b>Coleta de Dados.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2</b>	<b>Pré-Processamento dos Dados.....</b>	<b>41</b>
	4.2.1 Conversão para Reflectância .....	42
	4.2.2 Conversão para Radiância .....	43
<b>4.3</b>	<b>Aplicação dos Índices .....</b>	<b>43</b>
<b>4.4</b>	<b>Aplicação dos Transectos.....</b>	<b>44</b>
<b>4.5</b>	<b>Organização dos Dados e Análise Estatística .....</b>	<b>45</b>
<b>4.6</b>	<b>Fatiamento das Imagens .....</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussão .....</b>	<b>47</b>
<b>5.1</b>	<b>São Paulo .....</b>	<b>48</b>
<b>5.2</b>	<b>Rio de Janeiro.....</b>	<b>51</b>
<b>5.3</b>	<b>Belo Horizonte .....</b>	<b>54</b>
<b>5.4</b>	<b>Brasília.....</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>66</b>
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O intenso processo de urbanização pelo qual as grandes metrópoles brasileiras vêm enfrentando contribui para o surgimento de um cenário um tanto complexo em termos ambientais. Envolve a supressão da vegetação em detrimento do processo de ocupação urbana, que por sua vez ocorre de forma bastante irregular pois traz consigo um intenso fluxo populacional e a expansão em larga escala das grandes cidades, formando as chamadas Regiões Metropolitanas (RM's), que apesar de trazerem benefícios econômicos e logísticos em termos de integração, representam áreas potenciais para a formação das ilhas de calor, as quais, de acordo com Teza e Baptista (2005, p.3912), “ocorrem basicamente devido às diferenças de irradiação de calor entre as regiões edificadas, das regiões com solo exposto e das regiões com vegetação e também à concentração de poluentes, maior nas zonas centrais da cidade”.

Nesse sentido, as ferramentas de sensoriamento remoto contribuem eficazmente para a obtenção de um panorama mais preciso e em diferentes escalas, tanto em termos espaciais quanto temporais, com relação ao comportamento de uma determinada região frente a transformações no meio físico ou interferência de fenômenos climáticos.

Aliado às influências de fatores como temperatura e umidade, os quais, conseqüentemente, também variam em função da sazonalidade, algumas regiões em determinadas estações do ano podem formar ilhas de calor em maior intensidade do que outras, justamente em função dos fatores destacados. Além disso, como a intensificação do processo de urbanização resulta, de modo geral, em menores vestígios de vegetação remanescentes, e conseqüente diminuição do sequestro de carbono pelas plantas, esse trabalho busca explicar a relação entre a presença e ausência de vegetação fotossinteticamente ativa com a variação da temperatura de superfície.

As áreas verdes urbanas, neste contexto passam a ser um componente estratégico da cidade contribuindo com o ciclo hidrológico, com o controle de erosões, estabilização de encostas, regulação dos fluxos em canais de drenagem, oferecendo áreas de sombreamento, retenção de partículas, redução do ruído além de contribuir para a democratização de espaços para práticas de lazer, atividades de educação ambiental e amenização térmica.

Dessa forma, o presente trabalho apresenta a seguinte estrutura: no início será feita uma revisão bibliográfica, a qual abordará os conceitos de maior relevância para a compreensão da relação entre sequestro de carbono e ilhas de calor urbanas, seguida de uma descrição das áreas de estudo e apresentação da metodologia utilizada para a análise da relação entre os fenômenos mencionados em função da sazonalidade. Ao final, será feita uma descrição dos resultados, por meio da apresentação de gráficos comparativos, que darão suporte à discussão por meio da comparação com a bibliografia já publicada relacionada ao tema.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a relação entre sequestro florestal de carbono e ilhas de calor urbanas utilizando dados de sensoriamento remoto dos sensores OLI e TIRS do LANDSAT 8 nas metrópoles de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar o efeito da urbanização tanto no comportamento térmico quanto no sequestro florestal de carbono;
- b) Verificar a interferência da sazonalidade no sequestro florestal de carbono e no comportamento da temperatura nas cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 O ELEMENTO CARBONO E O CICLO DO CARBONO

O carbono é um dos elementos químicos mais abundantes da natureza e se encontra combinado a milhares de outros compostos, já que um único átomo de carbono é capaz de realizar quatro ligações químicas ao mesmo tempo com outros átomos de carbono ou outros elementos químicos, o que permite que sejam formadas moléculas em inúmeras combinações (ADUAN, et al., 2004), dentre as quais se incluem todas as substâncias orgânicas e uma grande parcela das substâncias inorgânicas existentes. O elemento está presente em todas as espécies vivas, tanto animais quanto vegetais, estando disponível também na composição de resíduos fósseis como no caso do carvão e do petróleo. Esse conjunto de fatores faz com que o carbono seja considerado um elemento de fundamental importância para a manutenção da vida na Terra, uma vez que, em termos globais, o elemento, em suas diversas formas, está presente em todos os principais compartimentos naturais do planeta: atmosfera, hidrosfera, litosfera e biosfera.

O carbono é onipresente na natureza e seus compostos (proteínas, carboidratos e gorduras) são constituintes essenciais de toda a matéria viva, sendo fundamentais na respiração, fotossíntese e, inclusive, na regulação climática (MARTINS et al., 2003). Há uma grande variedade de compostos derivados do carbono que integram o seu ciclo global, dentre os quais se destacam, principalmente o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ).

O Ciclo do Carbono é o principal meio pelo qual ocorrem as dinâmicas entre as diversas formas nas quais o elemento pode ser encontrado em cada um dos compartimentos naturais, e é formado por dois ciclos que acontecem em diferentes velocidades: o ciclo biogeoquímico e o ciclo biológico. Enquanto o primeiro regula a transferência do carbono entre a atmosfera e a litosfera o segundo refere-se às transformações sofridas pelo elemento uma vez que é transferido para um determinado compartimento. O esquema presente na Figura 1 ilustra a dinâmica do elemento nos compartimentos naturais da Terra.

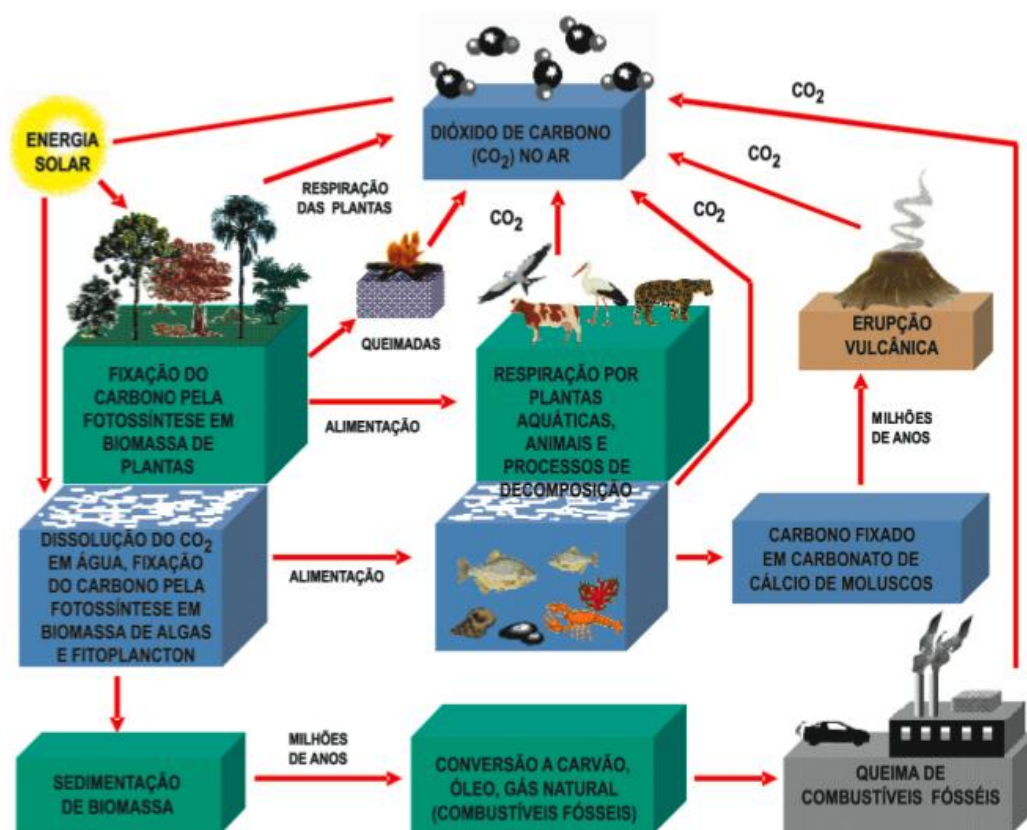


Figura 1 – Ciclo Global do Carbono.

Fonte: MARTINS et al., 2003

Conforme exibido pela Figura 1, o carbono presente na atmosfera na forma de  $\text{CO}_2$  movimenta-se por processos naturais para os continentes e os oceanos, sendo que esta movimentação pode ser vista como um processo cíclico, caracterizando o Ciclo Global do Carbono (ADUAN et al., 2004). A fotossíntese e o plâncton oceânico são os processos naturais que estão envolvidos na dinâmica do dióxido de carbono entre a atmosfera e os continentes e entre a atmosfera e os oceanos, respectivamente.

## 2.2 CARBONO NA ATMOSFERA

A atmosfera é uma camada fina de gases que encobre a Terra. De acordo com Manahan (2013), a atmosfera é um cobertor de proteção que nutre a vida no planeta, protegendo-o do ambiente hostil do espaço sideral. Nesse sentido, a atmosfera também tem a importante função de absorver a maior parte da radiação vinda do espaço, protegendo os organismos dos efeitos que causam, uma vez que apenas uma parte dessa radiação chega à superfície da Terra. Isso inclui também a absorção da energia solar, permitindo, de acordo com Manahan (2013) a

transmissão de teores expressivos de radiação nas regiões entre 300 e 2.500 nanômetros (o ultravioleta próximo, a radiação visível e o infravermelho próximo) e entre 0,01 e 40 m (ondas de rádio). Ao absorver a radiação eletromagnética abaixo de 300 nanômetros, a atmosfera filtra a radiação ultravioleta prejudicial que, do contrário, traria impactos para os organismos vivos. Além disso, uma vez que reabsorve a maior parte da radiação infravermelha, em um processo em que a energia solar absorvida pelo planeta é reemitida para o espaço, a atmosfera estabiliza a temperatura da Terra (efeito estufa), evitando os enormes extremos de temperatura observados em planetas e luas que não têm atmosferas substanciais.

A atmosfera é uma importante fonte de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o qual é fundamental à realização da fotossíntese, e de oxigênio para a respiração, e embora ela seja de grande magnitude e possua uma elevada resiliência, vem sendo bastante afetada pelo acúmulo em excesso dos chamados gases de efeito estufa, dentre os quais podemos citar, além do vapor d'água, o próprio dióxido de carbono, o metano, o óxido nitroso, dentre outros. Dos gases de efeito estufa liberados na atmosfera por meio da queima de combustíveis fósseis à base de carbono, o  $\text{CO}_2$  pode ser considerado o de maior abundância, levando-se em consideração ainda o fato de o gás ser emitido na atmosfera a partir do manejo inadequado do solo, fabricação de produtos, como o cimento, entre outras atividades.

A radiação solar que atinge a superfície terrestre e aquece o meio é reemitida na faixa de radiação infravermelha, conhecida também como radiação de ondas longas, a qual sentimos na forma de calor. O  $\text{CO}_2$ , assim como os outros gases de efeito estufa, absorvem parte do calor irradiado pela superfície, evitando que ela se perca para o espaço, fazendo com que haja um acúmulo de calor retido na atmosfera.

O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), em uma situação de equilíbrio, deveria se encontrar na atmosfera em concentrações bem baixas, da ordem de aproximadamente 0,03%, e, em proporções semelhantes, dissolvido na parte superficial dos mares, oceanos, rios e lagos. (ROSA et al., 2003). O elemento é removido da atmosfera pelo processo de fotossíntese, onde o carbono do  $\text{CO}_2$  é incorporado à biomassa dos vegetais, sendo utilizado também no processo de síntese de compostos orgânicos, que vão suprir os seres vivos.



## 2.3 SEQUESTRO FLORESTAL DE CARBONO

O conceito de sequestro de carbono consagrou-se na Conferência de Kyoto, no Japão, em 1997, onde uma das principais pautas foi a reversão do acúmulo de CO<sub>2</sub> na atmosfera como medida de redução do efeito estufa. Desde então, o papel da vegetação passou a ganhar cada vez mais atenção da comunidade científica por se tratarem de meios potenciais como fontes captadoras de CO<sub>2</sub> atmosférico, o qual também pode ocorrer por meio da ação do homem, a partir da utilização de tecnologias disponíveis. Entretanto, a vegetação ainda é considerada o meio mais eficiente, econômico e com maior tendência à manutenção do equilíbrio ecológico. Com relação ao sequestro florestal de carbono, Chang Man Yu (2004) destaca o fato de haver um maior interesse voltado às florestas tropicais úmidas pela sua elevada taxa de produtividade primária. Isso caracteriza o fato de as árvores removerem quantidades consideráveis de carbono da atmosfera, as quais vão reduzindo gradativamente a taxas quase insignificantes quando já estão formadas.

Com base nas palavras da autora constata-se que o sequestro florestal de carbono consiste no processo de crescimento das plantas, o qual ocorre por meio da fotossíntese, cujo processo permite, em suma, fixar o carbono em forma de biomassa nas plantas. Assim, quanto maior o porte de uma planta, por exemplo, maior sua biomassa e conseqüente maior o carbono acumulado. Por isso as plantas são consideradas importantes sumidouros de carbono, pois proporcionam o estoque do elemento por um maior espaço de tempo.

Um dos aspectos importantes do ciclo do carbono, de acordo com Manahan (2013) está no fato de ele ser o ciclo pelo qual a energia solar é transferida para sistemas biológicos. Nesse momento pode-se destacar o papel da fotossíntese, que de acordo com Barbosa et al. (2013), trata-se, em suma, do processo que consiste na conversão do CO<sub>2</sub> e da água em açúcares, para o crescimento e desenvolvimento das plantas, utilizando luz solar como fonte de energia, sendo que durante esse processo a molécula de água é dividida em átomos de hidrogênio e oxigênio, com este último sendo liberado ao ambiente e o hidrogênio convertendo o carbono inorgânico contido no CO<sub>2</sub> em material. Esse processo caracteriza-se como a principal fonte de energia para todos os seres vivos e possui a seguinte equação geral (MARTINS et al., 2003):



Onde:

$H_2O$  = Água;

$CO_2$  = Dióxido de Carbono;

$h\nu$  = fóton proveniente da radiação absorvida;

$(CH_2)_n$  = biomassa produzida no processo;

$O_2$  = Oxigênio.

A fotossíntese ocorre nos seres autotróficos, e também nas plantas, algas, plânctons e bactérias fotossintetizantes. Nas plantas, o processo ocorre em compartimentos da célula em organelas denominadas cloroplastos, onde encontram-se os pigmentos fotossintetizantes (clorofila, carotenóides e xantofila), os quais são estimulados pela absorção da energia solar a realizarem a síntese dos açúcares. Esse processo termina com a incorporação do carbono presente no  $CO_2$  absorvido da atmosfera no tecido dos organismos que realizaram o processo, caracterizando o sequestro do carbono.

## 2.4 ILHAS DE CALOR URBANAS

O processo de ocupação antrópica representa um impacto considerável em termos de disponibilidade dos recursos naturais. Um dos principais resultados da interação homem-meio ambiente se dá por meio do processo de urbanização, o qual produz impactos negativos ao meio ambiente principalmente em função de fatores como a geração de poluição, modificação das propriedades químicas e físicas da atmosfera, assim como da cobertura da superfície do solo, o que, consequentemente, está ligado à remoção da vegetação.

De acordo com Fialho (2012), a expansão da mancha urbana intensifica os fluxos interurbanos, além de incrementar a densidade da área construída, o que acarreta uma diferença no tempo de absorção da energia solar disponível durante o dia e da reemissão da energia terrestre à noite, fazendo com que haja um resfriamento mais lento da cidade após o pôr do sol, como consequência deste novo balanço energético. Isso ocorre em função da presença de materiais escuros presentes nas cidades, tais como asfaltos utilizados na pavimentação dos solos e telhados presentes em edificações, que possuem a capacidade de absorver e armazenar calor. Já durante a noite, esses materiais mantêm a temperatura nas cidades mais elevadas, quando comparadas com áreas rurais, com vegetação predominante. Esse fenômeno é denominado ilhas de calor urbanas, cujo termo foi

utilizado pela primeira vez por Manley em 1960 (FIALHO, 2012). Dentre as principais consequências resultantes desse fenômeno destacam-se o aumento da temperatura, o aumento da concentração de poluentes e uma diminuição da umidade relativa.

Arrau & Peña (2010) descreveram o fenômeno de ilhas de calor como a presença de qualquer área mais quente do que a paisagem ao seu redor, as quais podem se desenvolver tanto em áreas urbanas quanto rurais, embora haja um conhecimento relativamente menor quanto ao comportamento das ilhas de calor que ocorrem em áreas fora do eixo urbano, tendo em vista seu menor potencial de risco ao ser humano ou ao meio ambiente. Ainda de acordo com os autores, um dos principais efeitos desse fenômeno se revela com o aumento da temperatura atmosférica. Isso se deve ao fato de as superfícies das áreas urbanas que sofrem o efeito serem caracterizadas por um baixo albedo, elevada impermeabilidade e propriedades térmicas favoráveis ao armazenamento de energia e liberação de calor. Ainda de acordo com os autores existem alguns tipos de ilhas de calor, a saber:

- Ilhas de Calor Urbanas de Superfície: trata-se, basicamente, da ilha de calor urbana observada pelas técnicas de sensoriamento remoto, por meio das quais observa-se o fenômeno a partir da utilização de dados referentes ao comprimento de onda do infravermelho termal, o qual permite que se identifique as temperaturas na superfície da terra. De modo geral, os autores afirmam que há uma relação estreita entre as temperaturas do ar nas proximidades da superfície e das temperaturas na superfície da terra, o que faz com que a ilha de calor urbana de superfície seja um indicador confiável para a ilha de calor urbana atmosférica.
- Microilhas de calor urbanas: referem-se a pontos quentes na paisagem urbana, tais como estacionamentos, telhados antirreflexo e estradas asfaltadas com ausência de vegetação. São fortemente afetadas por fatores microclimáticos e os dados de sensoriamento remoto tornam-se essenciais para a identificação dos focos de calor da cena analisada.
- Dissipadores de calor urbano: também chamado de ilha de calor negativa, trata-se da ocorrência de uma cidade ou área urbana mais fria que as áreas rurais ao seu redor. Muito embora haja poucos estudos sobre esse assunto,

os autores afirmam que houveram registros do fenômeno em cidades com clima tropical, semiárido e temperado, especialmente pelas manhãs.

Teza e Baptista (2005) destacam parâmetros importantes para a determinação e caracterização da intensidade das ilhas urbanas de calor:

- Redução da evaporação (em função da ausência de vegetação e água disponível);
- A radiação solar que não é usada na evaporação é carregada para o aquecimento das edificações e do ar da cidade;
- O aumento da rugosidade causado pela presença de edifícios leva a um aumento da turbulência, que atua na transferência do calor para cima, ao mesmo tempo em que diminui o escoamento zonal;
- Quantidade de solo exposto, o que também leva ao aumento da temperatura de superfície;
- Topografia da cidade, onde montanhas e vales podem servir como barreiras para a dispersão do ar quente;
- As propriedades térmicas dos edifícios e dos materiais utilizados na pavimentação das cidades absorvem energia durante o dia e emitem radiação de onda longa durante a noite, levando a um aumento da temperatura durante a noite, chegando a superar a temperatura durante o dia (LOMBARDO, 1985 apud TEZA e BAPTISTA, 2005).

A temperatura de superfície pode exercer uma influência, mesmo que indireta, bastante significativa na temperatura do ar. Parques e áreas verdes, por exemplo, que geralmente possuem temperatura de superfície mais frias, influenciam na diminuição da temperatura do ar, enquanto que áreas construídas e pavimentadas influenciam no sentido oposto. As temperaturas de superfície e do ar se misturam na atmosfera e não possuem uma relação constante. Mesmo assim, a temperatura do ar varia menos que a temperatura de superfície ao longo de uma determinada área. A Figura 2 apresenta as variações das temperaturas de superfície e do ar durante o dia e durante a noite, ao longo de determinados alvos.

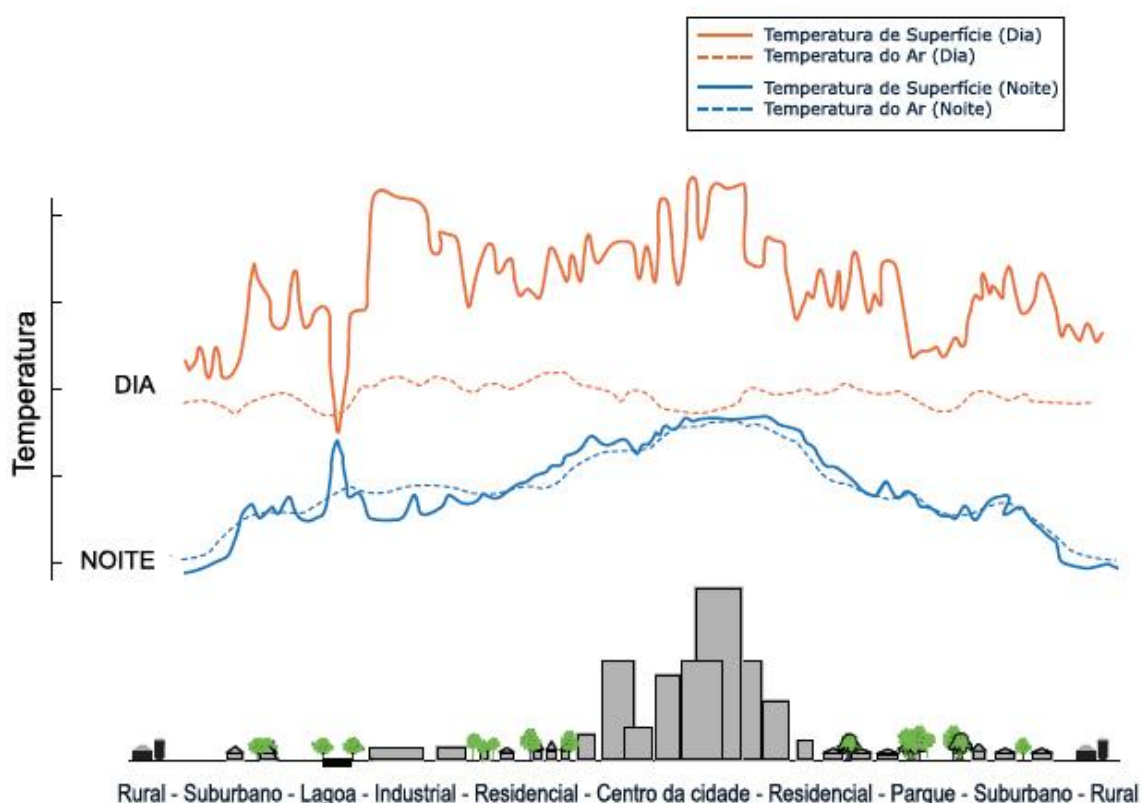


Figura 2 – Variações entre as temperaturas de superfície e do ar.  
Fonte: Adaptado de EPA.

O comportamento térmico urbano se difere das áreas rurais, uma vez que a temperatura em áreas urbanas é fortemente influenciada pela temperatura do ar, cuja interação com os diferentes alvos do meio urbano se dá na forma de energia radiante, também denominada de temperatura de brilho, a qual contribui diretamente para a formação das ilhas de calor urbanas. Além disso, o efeito das ilhas de calor pode modificar as correntes de ar e a precipitação, o que pode ser influenciado pelo tipo de sistema meteorológico predominante no local analisado, sua posição geográfica e ainda a estrutura das edificações.

## 2.5 ALBEDO

O albedo é uma unidade em porcentagem que define o quanto de insolação é refletida, por exemplo, um albedo de 100% significa reflectância total, enquanto 0% significa absorção total (CHRISTOPHERSON, 2012). Essa absorção ou reflexão está relacionada a diversos fatores como textura, cor e composição da superfície. A Figura 3 demonstra alguns valores de albedos de determinadas superfícies.

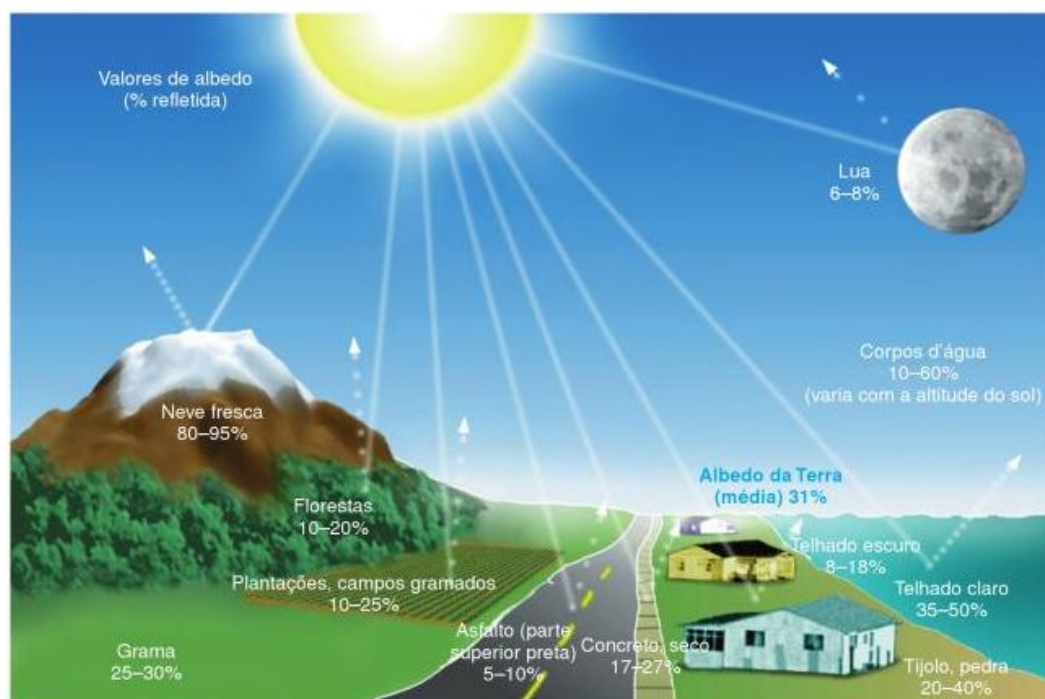


Figura 3 – Albedos de superfícies diversas.  
Fonte: CHRISTOPHERSON, 2012.

## 2.6 SENSORIAMENTO REMOTO

Definições de Sensoriamento Remoto são diversas na literatura e nem sempre entram em consenso. Como o presente trabalho trata especificadamente de processamento de dados de imagens de satélite a melhor definição é a de Novo (2008), que define Sensoriamento Remoto (SR) como sendo a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processar e transmitir dados colocados a bordo de aeronaves ou outras plataformas, visando estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta a partir do registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações.

A captação das imagens de satélite é possível devido à interação da radiação solar com os alvos terrestres. Essa energia se propaga pelo vácuo na velocidade da luz através do campo eletromagnético, assim pode ser definida como radiação eletromagnética (REM), a qual consiste em ondas eletromagnéticas de baixo comprimento de onda e altas frequências (ondas curtas). O espectro eletromagnético compõe os comprimentos de onda das radiações de raios gama a ondas de rádio e, portanto, é dividido em bandas com seus intervalos de frequência.

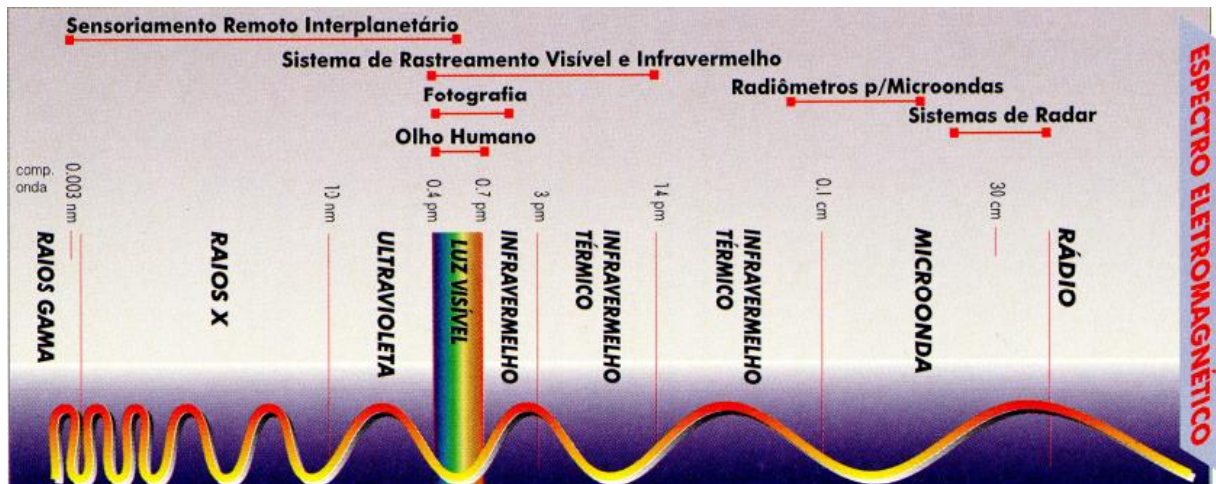


Figura 4 – O espectro eletromagnético com comprimentos de onda e suas representações.  
Fonte: MORAES e FIORIO, 2002.

Toda a radiação que intercepta a Terra sofre modificações devido à interferência da atmosfera, sendo que esta que age como um filtro, absorvendo grande parte da radiação nociva e de partículas carregadas.

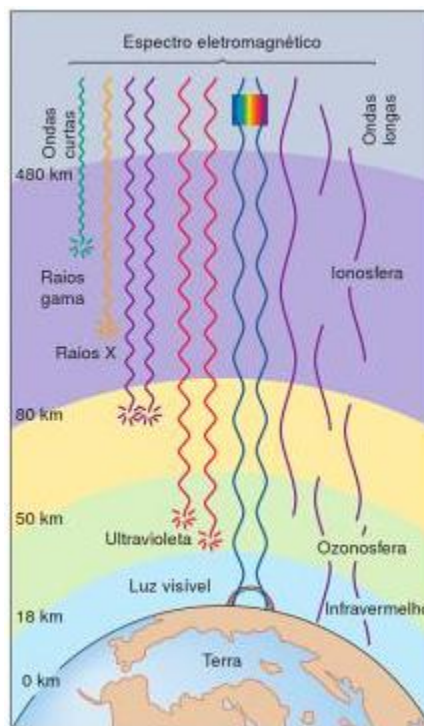


Figura 5 – Influência da atmosfera na radiação eletromagnética.  
Fonte: CHRISTOPHERSON, 2012.

Na Figura 5 tem-se a atmosfera em duas divisões, a Ionosfera e a Ozonosfera. De acordo com Christopherson (2012), a Ionosfera é a camada exterior funcional da atmosfera e é composta pela termosfera e mesosfera, essa região é responsável pela absorção de raios cósmicos, raios gama, raios X e parte mais energética da radiação ultravioleta. Ainda de acordo com o autor, a Ozonosfera,



também chamada de camada de ozônio compreende a parte alta da estratosfera que tem níveis altos de ozônio e é responsável pela conversão de parte da radiação ultravioleta em radiações com comprimentos de onda mais longos, como a radiação infravermelha, isso acontece pela absorção da radiação UV e reirradiação dessa energia pelas moléculas de ozônio. Após essa filtragem pela atmosfera, a superfície terrestre recebe diretamente as outras bandas de radiação eletromagnética, da radiação UV menos energética, luz visível e ondas do infravermelho a micro-ondas. O restante dessa radiação que consegue penetrar na atmosfera sem ser filtrada entra em contato direto com os diversos alvos encontrados na superfície, os quais refletem parte dessa radiação que irá atravessar novamente a atmosfera e será captada pelo satélite.

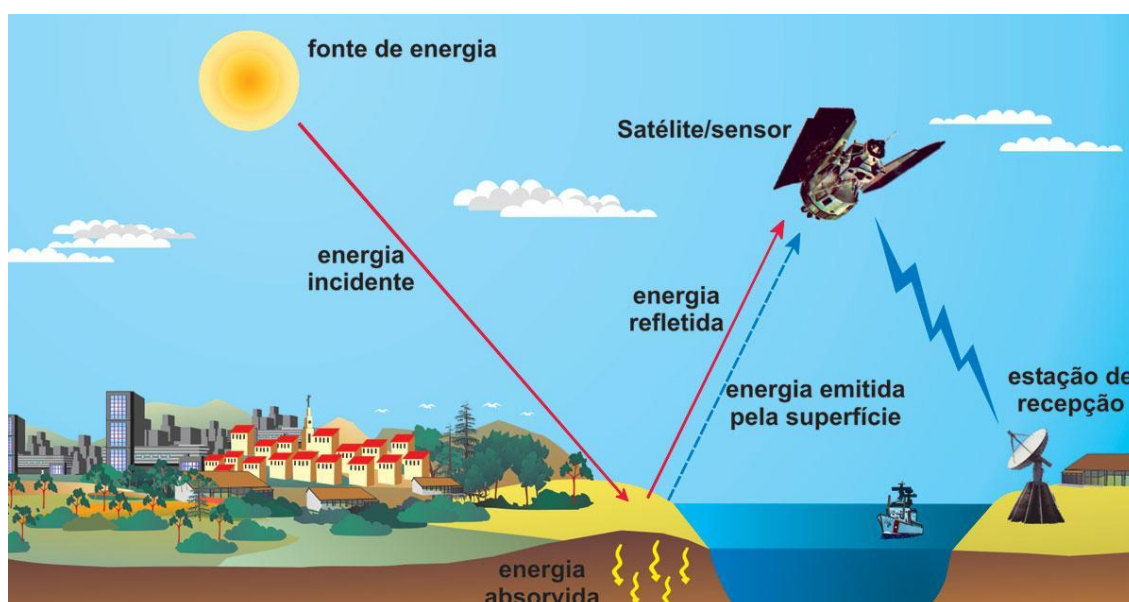


Figura 6 – Obtenção de imagens por sensoriamento remoto.  
Fonte: FLORENZANO, 2011.

As imagens de satélite têm características distintas a depender do seu satélite e sensor. Este trabalho utiliza dados do satélite Landsat 8 do programa americano Landsat, o qual é o principal no campo de sensoriamento remoto devido a facilidade de acesso dos dados, da qualidade dos mesmos e ao mais longo registro contínuo da superfície terrestre. Com ele é possível obter imagens a partir do início da década de 70 até os dias de hoje entre seus diversos satélites já colocados em órbita.



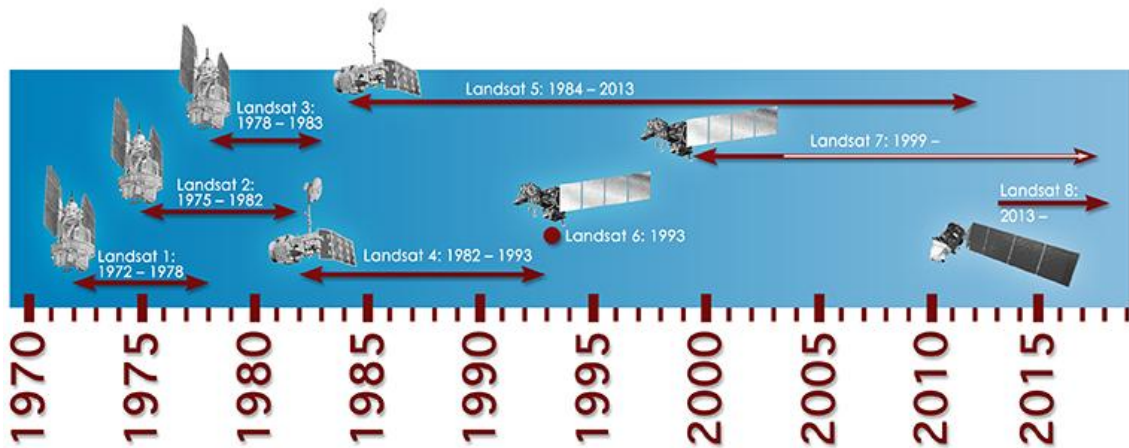


Figura 7 – Linha do tempo do programa Landsat.  
Fonte: NASA.

O produto desses satélites é composto por imagens de diversas bandas que estarão captando um determinado intervalo do espectro eletromagnético, o Landsat 1 tinha apenas quatro bandas (uma verde, uma vermelha e duas infravermelhas), já o Landsat 8 é composto por onze bandas.

O *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM), também conhecido por Landsat 8, é uma parceria entre a NASA e USGS e foi lançado em órbita em 11 de fevereiro de 2013. Traz novidades em relação aos satélites anteriores da série Landsat, possuindo dois instrumentos imageadores, sendo um deles um sensor ótico (OLI – *Operational Land Imager*) com duas novas bandas, uma para detectar nuvens de alta altitude (*Cirrus*) e outra para estudos da atmosfera e a qualidade da água em lagos e águas costeiras (*Coastal /Aerosol*). Além disso, o sistema apresenta um sensor infravermelho termal (TIRS – *Thermal InfraRed Sensor*) com duas bandas de ondas longas que irão coletar dados termais e co-registrar com dados OLI (USGS, 2012).

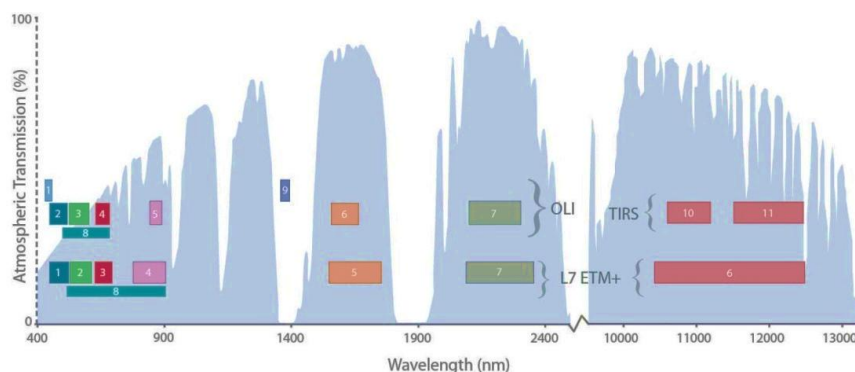


Figura 8 – Comparação das bandas do Landsat 8 e do Landsat 7 em função dos intervalos de comprimento de onda.  
Fonte NASA.

<b>Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)</b>	<b>Bandas</b>	<b>Comprimento de onda (micrômetros)</b>	<b>Resolução (metros)</b>
	Banda 1 – Costal/Aerossol	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 – Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 – Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 – Vermelho	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 – Infravermelho Próximo (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 – Infravermelho de ondas curtas (SWIR) 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 – Infravermelho de ondas curtas (SWIR) 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 – Pancromática	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 – Cirrus	1.36 - 1.38	30

Quadro 1 – Bandas do sensor OLI do Landsat 8, seus comprimentos de onda e resolução.  
Fonte: adaptado de NASA.

<b>Thermal Infrared Sensor (TIRS)</b>	<b>Bandas</b>	<b>Comprimento de onda (micrômetros)</b>	<b>Resolução (metros)</b>
	Banda 10 – Infravermelho Termal (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 * (30)
	Banda 11 – Infravermelho Termal (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 * (30)

Quadro 2 – Bandas do sensor TIRS do Landsat 8, seus comprimentos de onda e resolução.  
Fonte: adaptado de NASA.

Cada alvo da superfície terrestre ao entrar em contato com a radiação eletromagnética terá uma resposta espectral diferenciada que pode ser observada por meio de histogramas e comparadas entre si. Também é um método para identificação do alvo quando a visualização do mesmo não é clara.

## Curvas espectrais

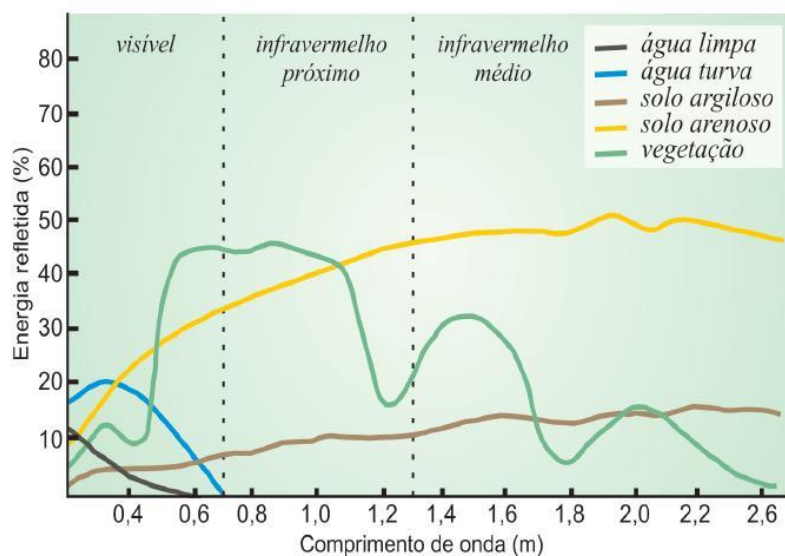


Figura 9 – Curvas espectrais de diferentes alvos.

Fonte: FLORENZANO, 2011.

O sensoriamento remoto vem sendo uma ferramenta poderosa para estudos nas diversas áreas das geociências sendo útil em diversas análises de âmbito ecológico, ambiental, urbano, rural a depender apenas da necessidade do pesquisador. As imagens de satélite coletadas podem ser processadas através de softwares especializados, como o ENVI<sup>®</sup> para obter os resultados diversos. Podem-se aplicar filtros, diversos tipos de contraste, realizar classificações, transformações e, como foco nesse trabalho, a realização de operações aritméticas com as bandas.

As operações aritméticas são baseadas em transformações espectrais de técnicas de realce através de formulações algorítmicas. Essas transformações são realizadas a partir da combinação de imagens e na geração de um produto distinto e acontecem pixel a pixel da imagem, ou seja, geram uma nova matriz de dados. Com essas operações é possível a aplicação de realce de similaridade e diferença espectrais dos alvos. É com as operações aritméticas que são aplicados os índices diversos como índices de vegetação, de solo, de rochas a índices mais complexos como o CO<sub>2</sub>flux, o qual utiliza operações aritméticas de índices previamente calculados.

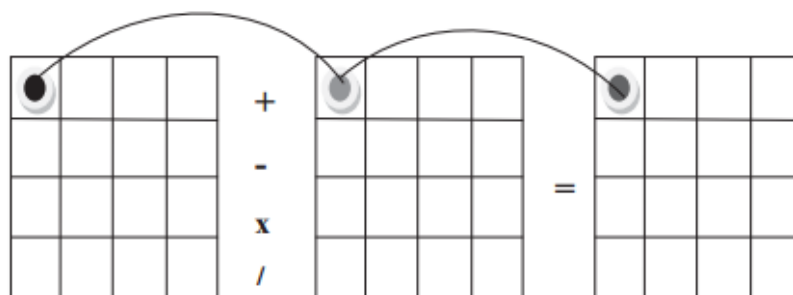


Figura 10 – Demonstração das operações aritméticas validando pixel a pixel.

Fonte: MENESES e ALMEIDA, 2012.

### 2.6.1 ÍNDICES ESPECTRAIS

Os produtos do Landsat 8 são imagens compostas por pixels compondo uma matriz onde cada pixel tem um valor, o número digital (ND). Esses valores de ND vão depender da resolução radiométrica da imagem, a qual é dada em bits, para o Landsat 8, as imagens são de 16 bits, o que significa que cada número digital é composto por números binários de 16 dígitos. A quantidade de bits, ou seja, a resolução radiométrica da imagem vai definir quantos níveis de cinza vão compor a imagem, por exemplo, uma imagem de 4 bits ( $2^4 = 16$ ) terá uma escala de 16 níveis de cinza, já as imagens do Landsat 8 de 16 bits ( $2^{16} = 65536$ ) tem mais de 65 mil níveis de cinza e são escalonados em 55 mil níveis de cinza (USGS, NASA). Esse é um dos motivos pelo qual as imagens do novo satélite têm qualidade superior de detalhes comparados aos satélites anteriores, por exemplo, do Landsat 5 que tem 8 bits ( $2^8 = 256$  níveis de cinza) de resolução, mesmo tendo resolução espacial igual (30m).

Para o cálculo dos índices, utilizam-se as operações aritméticas, as quais irão trabalhar na matriz de pixel para o processamento das operações como demonstrado na Figura 10.

#### 2.6.1.1 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é o índice de vegetação mais utilizado nos dias atuais principalmente em análises multitemporais e sazonais visando a comparação da cobertura vegetal. Esse índice foi primeiramente utilizado por Rouse em 1973 frente à necessidade crescente da época em análises espaciais principalmente na agricultura. Na época, Rouse propôs a utilização das bandas 5 e 7 (banda do vermelho e infravermelho) de dados ERTS-1 (Landsat 1) para a

quantificação das condições vegetais como biomassa verde e quantidade de umidade no intuito de monitorar o “efeito de onda verde” (*green wave effect*), o qual se tratava do avanço primaveril e retrogradação da vegetação natural (ROUSE, 1973). Com isso foi possível fornecer informações sobre a condição do crescimento da vegetação de pastagens regionais para o manejo de pastagens e atividades agrícolas no geral do *Great Plains* (projeto norte americano de extensiva produção agrícola e pecuária).

Para o cálculo do índice utiliza-se a fórmula a seguir:

$$NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red})} \quad (2)$$

Onde:

$R_{NIR}$  = Banda do infravermelho próximo (*Near Infrared*).

$R_{RED}$  = Banda do vermelho.

#### 2.6.1.2 Índice de Reflectância Fotoquímica – PRI

O PRI (*Photochemical Reflectance Index*) foi inicialmente explorado por Gamon em 1997 como um indicador da eficiência do uso da radiação fotossintética por 20 espécies de tipos funcionais de vegetação (GAMON, 1997). Nesse experimento foi possível identificar a relação dos pigmentos com a radiação incidente, portanto, o PRI é um índice para a medição da atividade do ciclo de Xantofilas. As Xantofilas são pigmentos amarelos, também chamados de pigmentos acessórios, que exercem a função de receptores da radiação para a fotossíntese, assim como as clorofilas (LARCHER, 2000). Esses pigmentos também exercem um papel de fotoproteção ao dissipar radiação em excesso (TROTTER et al., 2001) no ciclo da xantofila, o qual converte pigmentos através de reações fotoquímicas. A quantificação dessa radiação em excesso refletida é possível por meio do índice PRI utilizando-se as bandas do azul e do verde, proposto inicialmente por Gamon em 1997. Seu valor varia de -1 a 1.

$$PRI = \frac{(R_{Blue} - R_{Green})}{(R_{Blue} + R_{Green})} \quad (3)$$

Onde:

$R_{BLUE}$  = Banda do azul.

$R_{GREEN}$  = Banda do verde.

### 2.6.1.3 CO<sub>2</sub>FLUX

O CO<sub>2</sub>flux é utilizado para a quantificação do fluxo do dióxido de carbono de forma a medir o sequestro do carbono da baixa atmosfera. Foi primeiramente utilizado por Rahman em 2000 para o melhor entendimento dos fluxos de carbono de florestas boreais e a resposta que essas florestas poderiam ter com mudanças climáticas, fato esse que era estudado em grande escala na região boreal canadense pelo “*Boreal Ecosystem-Atmosphere Study*”. O NDVI é uma função da fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação, já o PRI funciona como um instrumento de medição da eficiência do uso da radiação pela vegetação (RAHMAN, 2000), com isso foi proposta a junção desses índices para a captação do sequestro de carbono. O índice varia de 0 a 1 e utiliza as bandas do vermelho, infravermelho (NDVI) e do azul e verde (PRI). Para o cálculo do mesmo é necessário o reescalonamento do PRI para que este varie de 0 a 1, portanto a fórmula para o CO<sub>2</sub>flux é proposta da seguinte forma:

$$\text{CO}_2\text{flux} = (\text{NDVI} \times \text{sPRI}) \quad (4)$$

### 2.6.1.4 Temperatura de Brilho

O cálculo utilizado para análises da formação das ilhas urbanas de calor é possível por meio da temperatura de brilho, a qual é medida por meio da intensidade em um comprimento de onda. Wukelic (1989) apontou a necessidade da calibração correta de dados do satélite mesmo em órbita e retomou técnicas de Markham e Barker (1986) para a transformação dos números digitais da imagem para dados em radiância, com isso propôs uma nova calibração para a banda termal 6 do imageador TM, por meio da inversão da função de Planck. Assim, Wukelic (1989) demonstrou a potencialidade da temperatura de brilho para obtenção de dados de temperatura.

O imageador TIRS do Landsat 8 conta com duas imagens termais, banda 10 e 11, cujos comprimentos de onda contemplam o intervalo da antiga banda 6 do Landsat 5. Para o cálculo da temperatura de brilho é usada a fórmula a seguir:

$$T = \frac{K_2}{\ln(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1)} \quad (5)$$

Onde:

$T$  = Temperatura de Brilho (K)

$L_\lambda$  = Radiância Espectral no Topo da Atmosfera ( $\text{Watts/m}^{-2}\text{srad}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ )

$K_1$  = Constante de conversão termal obtido nos metadados.

$K_2$  = Constante de conversão termal obtido nos metadados.

### **3 ÁREA DE ESTUDO**

Conforme já citado anteriormente, esse trabalho apresenta a relação entre sequestro de carbono e ilhas urbanas de calor em quatro cidades brasileiras, sendo elas: São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília. A definição dessas áreas de estudo se deu em função de esse grupo de cidades integrarem, juntas, os núcleos de formação das maiores regiões metropolitanas do país (ou regiões integradas de desenvolvimento econômico, no caso de Brasília) tanto em termos de densidade populacional, quanto extensão territorial, todas tendo apresentado um crescimento bastante elevado nas últimas décadas.

Dessa forma, considerando a representatividade dessas áreas de estudo no território brasileiro, tanto em termos de crescimento, quanto em função dos impactos ambientais oriundos dos processos de expansão e urbanização as quais estão sendo constantemente submetidas, aliados ainda ao fato de apresentarem uma variedade de características distintas e particulares entre si, optou-se por uma padronização nos dados informados na caracterização de cada área, de modo a possibilitar possíveis comparações entre os parâmetros de maior relevância para esse trabalho. Assim, na descrição das características de cada área de estudo constam informações básicas referentes ao ordenamento territorial, incluindo os seguintes aspectos: área total e tamanho populacional tanto dos municípios quanto das regiões metropolitanas que integram; clima, incluindo dados de precipitação anual, temperaturas média, mínima e máxima, e umidade relativa do ar; e geografia local, incluindo aspectos como vegetação e relevo predominantes.



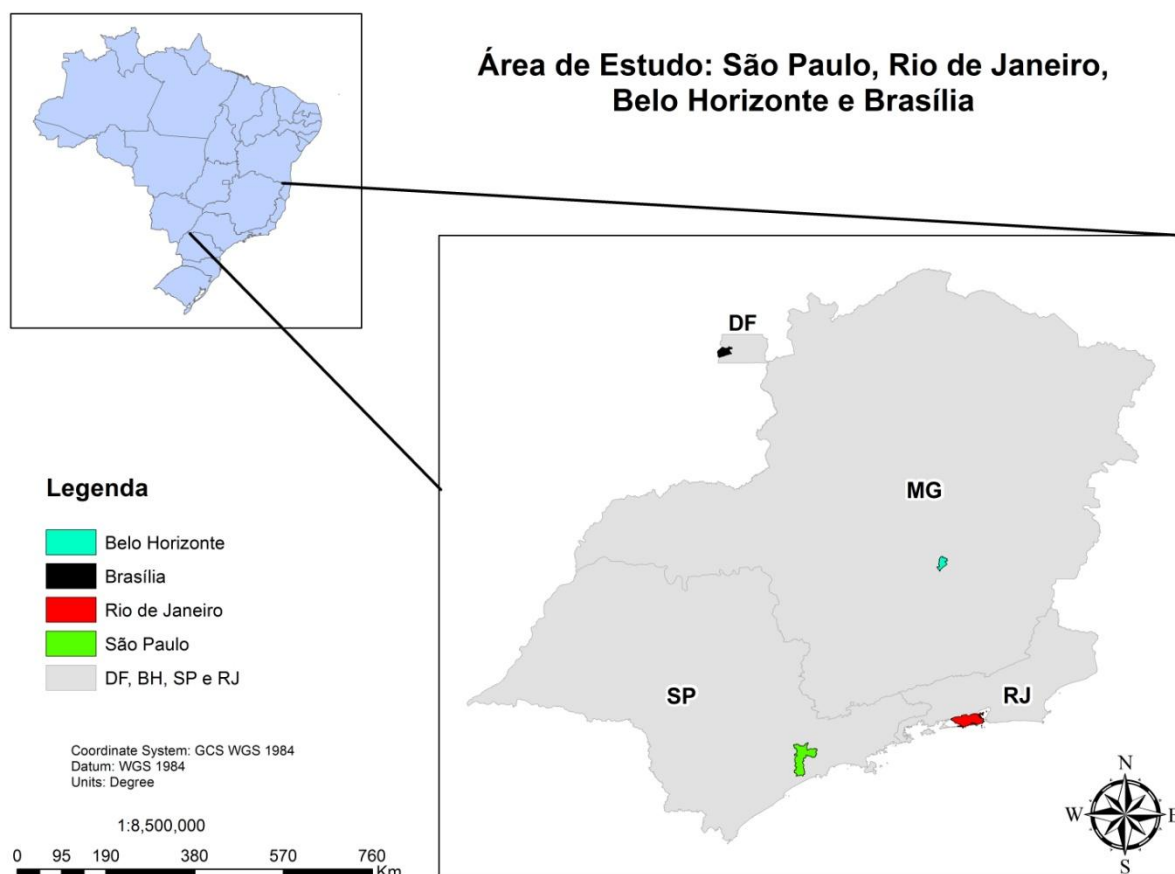


Figura 11 – Localização das áreas de estudo.

### 3.1 SÃO PAULO

A cidade é a capital do estado de São Paulo, na região Sudeste do Brasil, e situa-se a cerca de 23°32'53" latitude sul e 46°38'10" longitude oeste. De acordo com dados do IBGE do ano de 2014, a cidade possui população estimada em 11.895.893 habitantes, sendo considerada a mais populosa e mais extensa do país, com área aproximada de 1.521 km<sup>2</sup> e densidade demográfica de 7.398,26 habitantes/km<sup>2</sup>.

A cidade de São Paulo juntamente com outros 39 municípios integra a Região Metropolitana de São Paulo – RMSP, com população estimada em 19.683.975 habitantes, área de 8.047 km<sup>2</sup> e taxa de urbanização de 98,9% (IBGE).

Assim, como Belo Horizonte, o clima predominante na cidade de São Paulo é, de acordo com a classificação de Köppen, tropical de altitude, caracterizado por verão chuvoso com temperaturas elevadas e inverno seco com baixas temperaturas. A cidade está situada a cerca de 760 metros acima do nível do mar e as temperaturas variam entre 12°C no mês mais frio e 28°C no mês mais quente e a temperatura média anual é de 20,7°C. A precipitação total anual é de 1.376,2 mm e

concentra-se principalmente no verão, chegando a chover cerca de 240 mm em um único mês. A umidade relativa média do ar é de 73%.

A geomorfologia de São Paulo caracteriza-se por um compartimento rebaixado do Planalto Atlântico, conhecido como Bacia Sedimentar de São Paulo, com cerca de 8.000 km<sup>2</sup> de topografia marcada por colinas com alturas entre 600 e 900 metros. Já com relação à cobertura vegetal no município, de acordo com o Atlas Ambiental desenvolvido pela Prefeitura Municipal de São Paulo, a cobertura vegetal hoje existente no município constitui-se, basicamente, por fragmentos da vegetação natural secundária, que ainda resistem ao processo de expansão urbana em diferentes localidades da região, por ambientes implantados em áreas urbanizadas e por terrenos isolados.

### 3.2 RIO DE JANEIRO

A cidade do Rio de Janeiro situa-se a 22°54'11" latitude sul e 43°12'29" longitude oeste. É capital do estado do Rio de Janeiro, situado na região Sudeste do Brasil, e uma possui população estimada em 6.453.682 habitantes, área aproximada de 1.200 km<sup>2</sup> e densidade demográfica de 5.265,82 habitantes/km<sup>2</sup> (IBGE, 2014). Isso faz com que a cidade do Rio de Janeiro seja considerada a segunda maior do Brasil, tanto em termos de densidade demográfica, quanto em extensão territorial.

A cidade, juntamente com outros 19 municípios formam a Região Metropolitana do Rio de Janeiro – RMRJ, com população total de estimada em 11.711.233 habitantes (IBGE, 2010) e área de 5.292 km<sup>2</sup>. Além disso, a RMRJ apresenta a maior taxa de urbanização do país, chegando a 99,5% (IBGE, 2010).

A cidade é banhada pelo oceano Atlântico ao sul, pela Baía de Guanabara a leste e pela Baía de Sepetiba a oeste, o que faz com que suas divisas marítimas sejam mais extensas do que as divisas terrestres (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2009).

A cidade situa-se a menos de 50 metros acima do nível do mar e o clima predominante, de acordo com classificação de Köppen, é o clima tropical (Aw), marcado pela ocorrência de chuvas no verão, de dezembro a março, com precipitação anual média de 1065 mm. No mês de janeiro geralmente ocorre a máxima precipitação, chegando a 140 mm. A temperatura média anual na cidade é

de 23,77°C. No entanto, nos meses mais quentes a temperatura se eleva na cidade, variando entre 28°C e 30°C, enquanto que no inverno gira em torno de 19°C.

O município do Rio de Janeiro abriga um importante fragmento do bioma da Mata Atlântica em sua composição paisagística. Trata-se do Parque Nacional da Tijuca (PNT), criado em 6 de julho de 1961, o qual corresponde a 3,5% da área do município do Rio de Janeiro.

### 3.3 BELO HORIZONTE

Belo Horizonte é a capital do estado de Minas Gerais, localizado na região Sudeste do Brasil, situando-se a 19°49'01" latitude sul e 43°57'22" longitude oeste, e com cerca de 2.491.109 habitantes, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia Estatística – IBGE – de 2014. A cidade tem uma área de 331,401 km<sup>2</sup>, densidade demográfica de 7.167 habitantes/km<sup>2</sup> e pertence à terceira maior região metropolitana do país, a Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH, formada por 34 municípios, com população total de cerca de 4.819.288 habitantes (IBGE, 2010), área de aproximadamente 9.467 km<sup>2</sup> (MOREIRA, 2012) e taxa de urbanização de 97,5% (Síntese de Indicadores Sociais do IBGE, 2013).

O clima de Belo Horizonte, de acordo com a classificação de Köppen, é o tropical de altitude – Cwa. De acordo com Assis (2012), a primeira letra, C, refere-se ao grupo climático, clima temperado ou temperado quente, onde a temperatura do mês mais frio está entre 18°C e -0,3°C e a temperatura do mês mais quente maior que 10°C. A segunda letra, w, está relacionada à existência de uma estação seca que coincide com o inverno e um período chuvoso que compreende os meses de verão. A terceira letra, a, indica que a temperatura do mês mais quente é superior a 22°C. Segundo as normais climatológicas medidas entre 1961 e 1990 pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET – as temperaturas médias na cidade variam entre 13°C no mês mais frio e 29°C no mês mais quente, sendo que a temperatura média anual é de 21°C. A precipitação média anual chega a 1450 mm, sendo que em um único mês pode chover até 290 mm. Já a umidade relativa do ar apresenta um valor médio de 72%, com uma baixa variabilidade anual.

Minas Gerais é caracterizada por apresentar, de acordo com Drummond et al. (2005), inúmeros ambientes particulares inseridos no domínio de três biomas: o Cerrado, a Mata Atlântica e a Caatinga, ocupando, respectivamente, 57%, 41% e

2% da extensão territorial do Estado. A vegetação predominante em Belo Horizonte é característica do bioma Cerrado.

O Parque das Mangabeiras, considerado o símbolo de Belo Horizonte, é a maior área verde preservada da cidade, com cerca de 2,3 milhões de metros quadrados, e altitude variando entre 1.000 e 1.300 metros, abrigando cerca de 21 nascentes do córrego da Serra (ROCHA e ABJAUD, 2013). Nas partes mais altas da serra, a vegetação é composta por campos rupestres e campos de altitude, havendo também campo cerrado, que é típico de solos mais ácidos. Ainda é possível encontrar também, na área do parque, matas de galeria, nos fundos dos vales, nas proximidades dos cursos d'água, com predominância de solo fértil, favorecendo uma vegetação de grande porte.

Em termos geológicos, cerca de 70% do território da capital mineira localiza-se na Depressão de Belo Horizonte, caracterizada pela existência de colinas amplas e alongadas em sua maior parte, possuindo altitude com variação entre 800 e 900 metros e com relevo caracterizado por apresentar uma fisiologia bastante diversa e fortemente vinculada às propriedades geológicas de seu substrato, o qual há predominância de rochas arqueanas integrantes do Complexo Belo Horizonte. Segundo Bertollini e Carvalho (2010), em função do intenso processo de urbanização, o relevo original já foi bastante alterado por meio de escavações, aterros, construções de ruas e casas.

### 3.4 BRASÍLIA

Localizada no Distrito Federal, na região Centro-Oeste, a capital do país situa-se à 15°46'48" latitude sul e 47°55'48" longitude oeste e possui uma população estimada em 2.852.372 habitantes, área aproximada de 5.780 km<sup>2</sup> e densidade demográfica de 444,66 habitantes/km<sup>2</sup> (IBGE, 2014).

A cidade de Brasília forma, juntamente com o Distrito Federal e 22 municípios do entorno, dos quais 19 estão situados no Estado de Goiás e 3 no Estado de Minas Gerais, a Região Integrada de Desenvolvimento – RIDE – do Distrito Federal e Entorno, a qual abrange uma área de 55.402,2 km<sup>2</sup> e uma população estimada em 3.717.728 habitantes (IPEA, 2013). A taxa de urbanização do Distrito Federal é de 95,6%, a maior da região Centro-Oeste.

A altitude da região varia entre 1.000 e 1.200 metros acima do nível do mar e o clima, de acordo com a classificação de Köppen, pode ser enquadrado nos tipos

tropical (Aw), tropical de altitude Cwa e tropical de altitude Cwb (CODEPLAN, 1984). O clima tropical de altitude Cwa, que também é característico de Belo Horizonte, apresenta característica similar ao clima tropical de altitude Cwb em função da ocorrência de temperatura inferior a 18°C no mês mais frio e média inferior a 22°C no mês mais quente. Entretanto, no caso do Distrito Federal, enquanto o clima tropical de altitude Cwb é típico das chapadas mais elevadas, o Cwa ocorre no Pediplano de Brasília, cotas entre 1000 e 1200 metros (CODEPLAN, 1984). O clima tropical (Aw), por sua vez, situa-se nas principais bacias hidrográficas da região, as quais, inclusive, são consideradas umas das três bacias fluviais mais importantes da América do Sul, sendo elas as bacias: do Paraná (Rio Descoberto, Rio São Bartolomeu), do São Francisco (Rio Preto) e do Tocantins (Rio Maranhão).

De modo geral, é possível afirmar, de acordo com Conde et al. (2010), que o clima da região é marcado pela forte sazonalidade, apresentando dois períodos distintos bem caracterizados, sendo o período entre maio e setembro marcado pela baixa taxa de precipitação, baixa nebulosidade, alta taxa de evaporação, com baixas umidades relativas diárias, enquanto que o período que compreende os meses de outubro e abril apresenta comportamento inverso. Segundo as normais climatológicas medidas pelo INMET, a temperatura média anual na capital federal varia em torno de 20,5°C, sendo que nos meses mais frios a temperatura atinge uma média de 13°C e nos meses mais quentes gira em torno de 28°C. A precipitação média anual varia em torno de 1600 mm, sendo que em um único mês pode chegar a chover até 250 mm, especialmente nos meses de dezembro e janeiro.

Quanto à caracterização do meio físico, pode-se dizer que o bioma predominante na região é o Cerrado, responsável por encobrir cerca de 90% da área total do Distrito Federal. Além disso, em termos geológicos, a região está inserida na porção central da Faixa de Dobramentos e Cavalgamentos Brasília (MARINI, 1981), na sua transição das porções internas e externas, de maior e menor grau metamórfico, respectivamente, apresentando uma estruturação geral bastante complexa com superimposição de dobramentos com eixos ortogonais (CAMPOS, 2004). Ainda de acordo com o autor, a compartimentação geomorfológica do território da região, por sua vez, inclui áreas de chapada, regiões de dissecação intermediária, regiões dissecadas de vales, regiões de rebordo e regiões de escarpa.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

O fluxograma a seguir sintetiza o que será explicado nos itens que seguem.

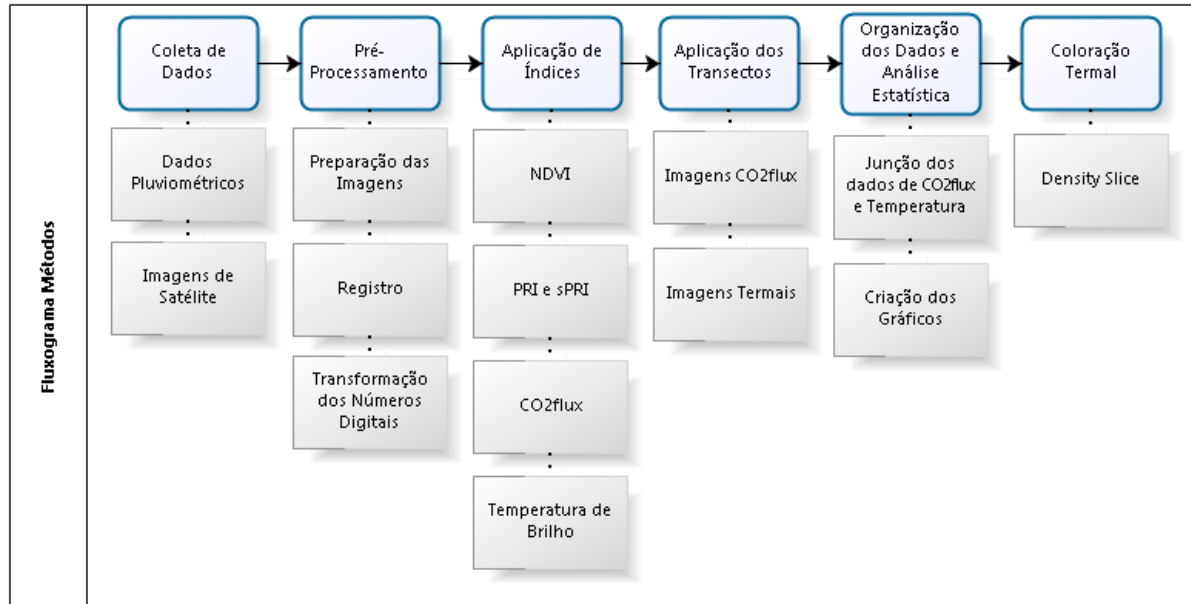
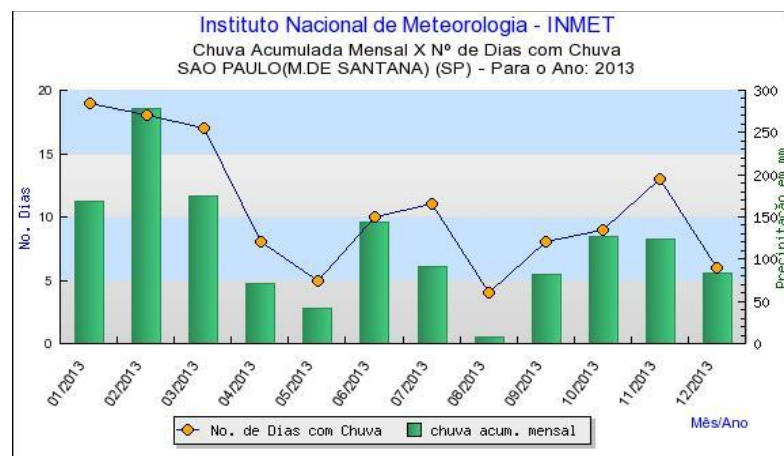
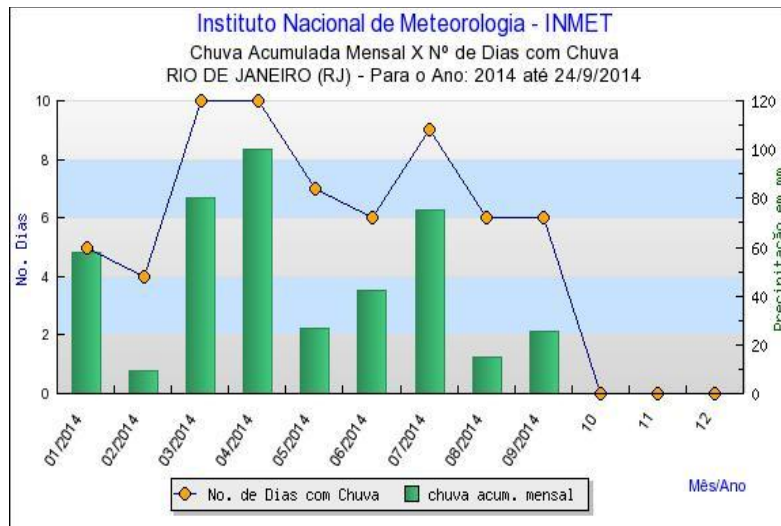
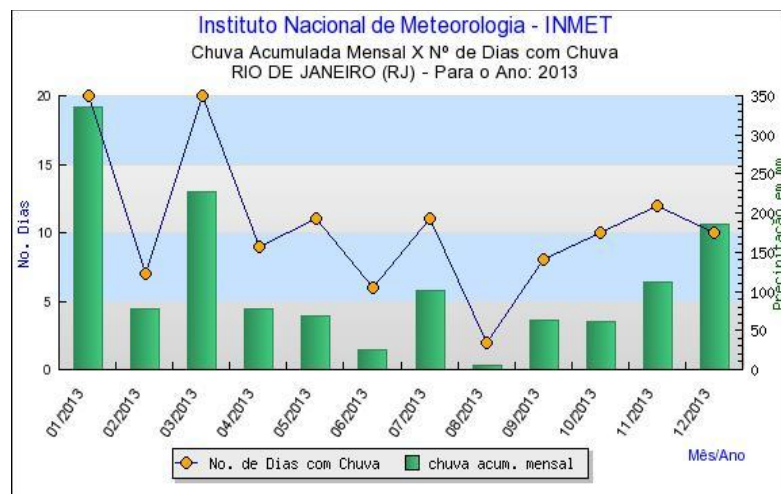
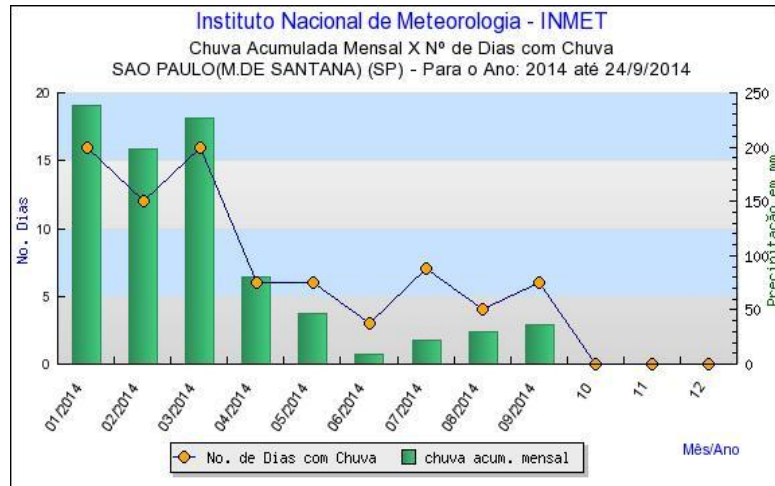


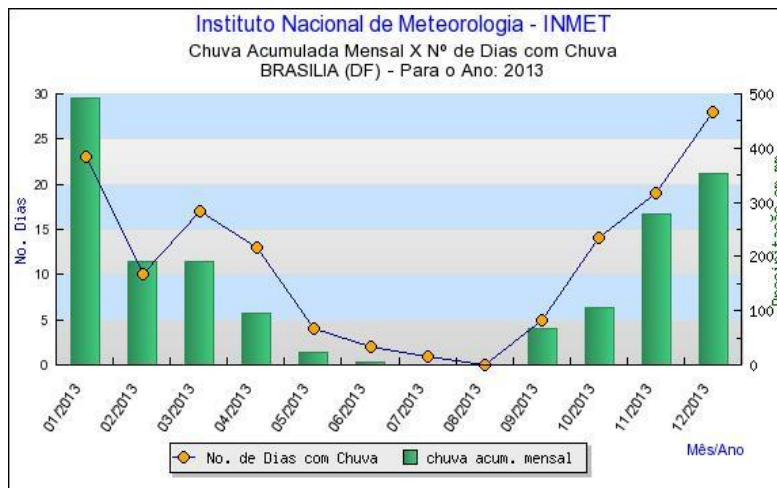
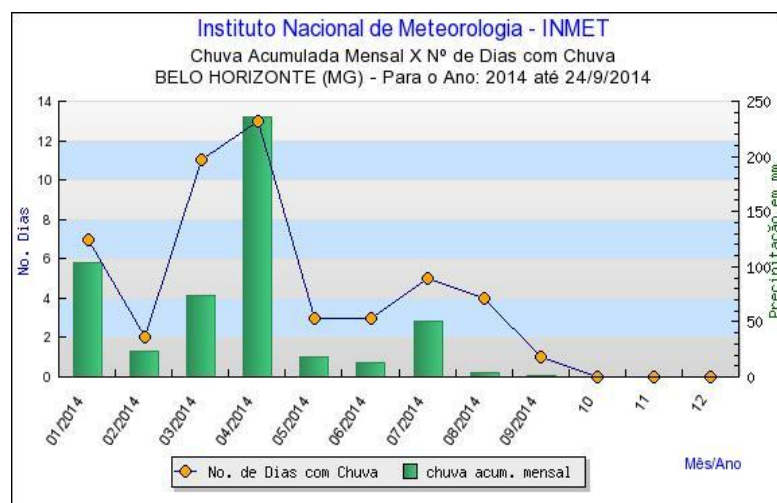
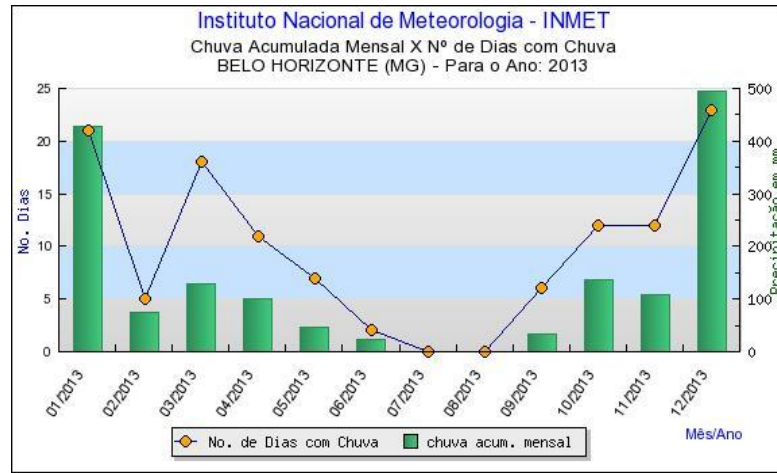
Figura 12 – Fluxograma dos métodos aplicados.

### 4.1 COLETA DE DADOS

Devido à sazonalidade pretendida na pesquisa, buscou-se a escolha das imagens de satélite de acordo com um padrão. Focou-se na diferença de umidade relativa, fato este diretamente ligado à pluviosidade, portanto foram definidas duas épocas para as cidades, uma de estiagem e uma de estação chuvosa. As imagens do início do ano foram definidas como de estação úmida e as de meio de ano como de seca, todas tendo como base os gráficos de pluviosidade do INMET.









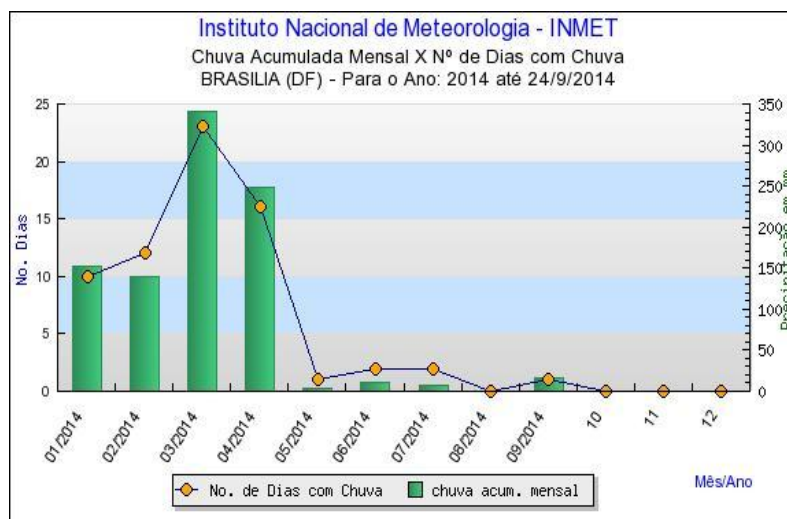


Figura 13 – Dados Pluviométricos de 2013 e 2014, respectivamente, das cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília.

Fonte: INMET

As imagens de satélite foram coletadas do site USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) e suas datas estão dispostas na Tabela 1, de acordo com os dados pluviométricos e a possibilidade de uso das mesmas, como por exemplo, sem o bloqueio de nuvens na área de estudo.

Tabela 1: Definição das cidades e datas das imagens de satélite coletadas.

Cidade	Data Chuvosa	Data Seca
<b>Belo Horizonte</b>	06/04/2014	25/08/2013
<b>Brasília</b>	05/01/2014	29/07/2013
<b>Rio de Janeiro</b>	25/01/2014	02/08/2013
<b>São Paulo</b>	08/02/2014	01/09/2013

## 4.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

Com as imagens escolhidas devem-se preparar os dados para iniciar o processamento. As etapas de pré-processamento realizadas foram a junção das bandas num único arquivo; a inclusão dos comprimentos de onda de cada banda da imagem (Quadro 1); registro das imagens; e transformação de Números Digitais para dados de radiância e reflectância no topo da atmosfera para os dados de sequestro e para temperatura de brilho para os dados termais.

O registro é realizado para atenuar o deslocamento dos pixels causado, por exemplo, pelo próprio movimento do satélite, dessa forma é possível uma análise

mais concreta dos pixels de imagens de outras datas sem o risco de uma representação diferente dos alvos. Assim aplicou-se o registro nas imagens de diferentes datas para mesma cidade, uma das imagens foi escolhida como base e todas as outras processadas a partir desta por meio dos GCP (*Ground Control Points*) totalizando 3 registros por cidade (imagem de estação de estiagem, de estação chuvosa e bandas termiais).

Os produtos do Landsat 8 fornecidos pelo USGS consistem em Números Digitais (ND) quantizados e calibrados que representam dados de imagem multiespectral adquiridos pelos dois imageadores do satélite, o OLI (*Operational Land Imager*) e o TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) mencionados anteriormente. Os produtos em ND podem ser convertidos tanto para a reflectância ou radiância medidos no topo da atmosfera (ou TOA - *Top Of Atmosphere*) usando coeficientes de reescalonamento radiométricos que estão disponíveis no arquivo dos metadados (*MTL file*). Os metadados também contêm as constantes termiais necessárias para converter dados do TIRS em Temperatura de Brilho.

Além disso, o imageador TIRS conta com duas bandas termiais: a Banda 10 encontra-se no intervalo de 10.60 – 11.19 micrômetros, enquanto a Banda 11 abrange o intervalo de 11.50 – 12.51 micrômetros (Quadro 1). Dessa forma, para a análise de temperatura houve a necessidade da escolha de uma banda termal. O trabalho de Vilarinho et al. (2014) apresentou diferença de resultados para as duas bandas termiais, tendo a banda 10 apresentado resultados mais satisfatórios para alvos mais quentes, como os centros da cidade, enquanto que a Banda 11 demonstrou maior sensibilidade para identificação de alvos mais frios, como o caso da vegetação. A Lei de deslocamento de Wien explicita a relação da temperatura com comprimento de onda, em que quanto maior for a temperatura do corpo haverá um deslocamento do pico máximo de emissão de radiação para comprimentos de onda menores (BATISTA e DIAS, 2005). Assim é natural o entendimento e escolha da Banda 10 para a análise termal dos dados de ilhas urbanas de calor devido seu menor comprimento de onda, logo melhor resposta espectral de alvos mais quentes.

#### **4.2.1 CONVERSÃO PARA REFLECTÂNCIA NO TOPO DA ATMOSFERA**

Os dados OLI são convertidos para reflectância no topo da atmosfera com os coeficientes disponíveis nos metadados, por meio da equação 6.

$$\rho\lambda' = M_{\rho}Q_{cal} + A_{\rho} \quad (6)$$

Onde:

$\rho\lambda'$  = Reflectância no Topo da Atmosfera, sem correção do ângulo solar.

$M_{\rho}$  = fator multiplicativo para cada banda, obtido nos metadados.

$A_{\rho}$  = fator aditivo para cada banda também, obtidos nos metadados.

$Q_{cal}$  = valor digital quantizado e calibrado de cada pixel (DN ou número digital).

Após a aplicação da equação 6 é realizada a normalização dos dados, visando reduzir a escala do fator de reflectância de 0 a 1, por meio da equação 7.

$$\frac{B1}{10000} \quad (7)$$

Onde:

B1 = a imagem já transformada em reflectância TOA.

#### 4.2.2 CONVERSÃO PARA RADIÂNCIA NO TOPO DA ATMOSFERA

Os dados do OLI e do TIRS podem ser convertidos para Radiância Espectral TOA usando fatores reescalados de radiância disponíveis nos metadados e a equação 8.

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (8)$$

Onde:

$L_{\lambda}$  = Radiância Espectral no Topo da Atmosfera ( $\text{Watts/m}^2\text{srad}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ )

$M_L$  = Fator multiplicativo para cada banda obtido nos metadados.

$A_L$  = Fator aditivo para cada banda obtido nos metadados.

$Q_{cal}$  = Valor digital quantizado e calibrado de cada pixel (DN ou número digital).

### 4.3 APLICAÇÃO DOS ÍNDICES

A pesquisa em questão necessita de dois dados finais, o  $\text{CO}_2\text{flux}$  e a Temperatura de Brilho conforme destacado pelo fluxograma da Figura 14 e descritos no item 2.6.1 (Índices Espectrais)

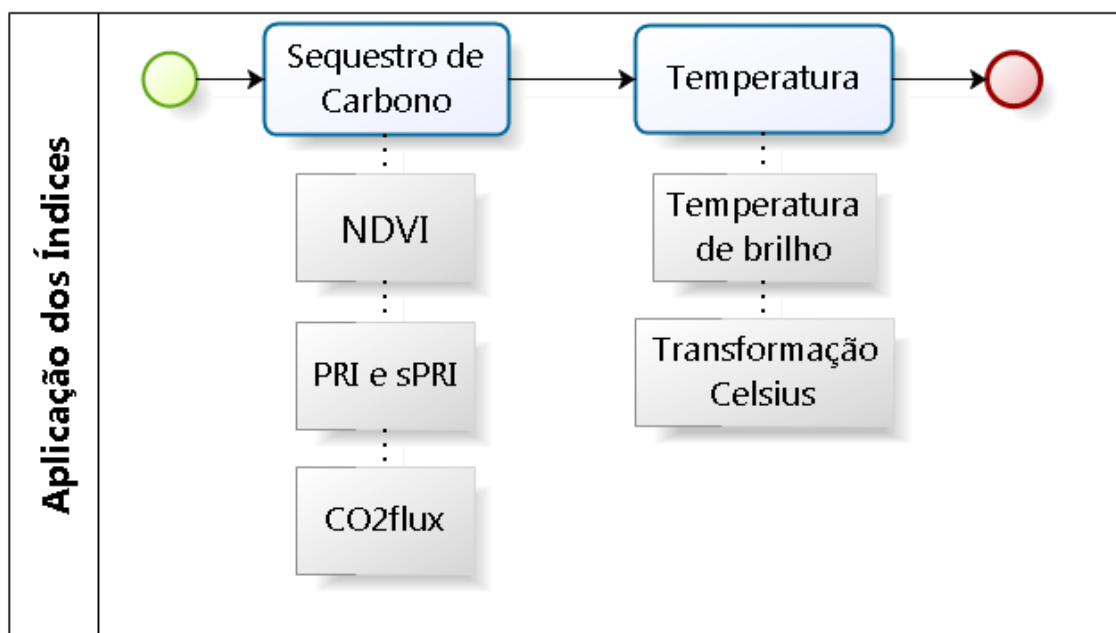


Figura 14 – Fluxograma para a aplicação de índices.

Como o PRI tem uma variação dos dados de -1 a 1, deve-se reescalonar os dados desse índice utilizando a Equação 9 que demonstra o cálculo do sPRI (índice de reflectância fotoquímico escalonado).

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2} \quad (9)$$

A equação utilizada para a temperatura de brilho calculada é dada originalmente em Kelvin (K), portanto deve-se converter os dados para graus Celsius (C°).

#### 4.4 APLICAÇÃO DOS TRANSECTOS

A partir das imagens já processadas é possível adquirir os dados de cada pixel. Esses dados informam um valor quantificado possível de comparação, isso é possível devido ao satélite ser sol síncrono, o qual passa pelo Equador às 10h da manhã (USGS, 2013), ou seja, os registros pelo satélite são efetuados na mesma hora do dia, pois para esses registros há a necessidade das mesmas condições de luz, fato esse importante para análises sazonais e multitemporais, pois pode-se haver a comparação de variáveis como temperatura sem que haja diferenciação por conta do período do dia. Para os resultados do CO<sub>2</sub>flux os valores são adimensionais variando de -1 a 1, enquanto que para a temperatura de brilho há um valor real de temperatura, a qual varia de acordo com o alvo. Adensamentos

populacionais possuem temperaturas que podem chegar acima dos 40°C, já as áreas bem arborizadas como matas de galeria, unidades de conservação e até mesmo a água terão temperaturas mais amenas.

Para a captação desses dados pixel a pixel o método utilizado foi o dos transectos, os quais se tratam de uma reta na cena, com início e fim, e cada ponto que essa reta tocou capta o dado do pixel. Dessa forma, os transectos foram aplicados nas imagens processadas com o CO<sub>2</sub>flux e com temperatura de brilho para as quatro cidades.

O critério utilizado para a definição dos transectos teve como base a identificação dos chamados Centros de Negócios (do inglês *Central Business District* - *CBD*) ou ainda o centro de cada metrópole, já que se tratam de áreas com intensa urbanização em termos de espaço físico construído, principalmente devido à elevada verticalização do espaço, fato esse que contribui consideravelmente para a alteração do clima e da atmosfera local (DOURADO FILHO, 2004). Com isso, os transectos foram aplicados de modo a abranger uma parte considerável da mancha urbana, incluindo as áreas centrais, onde para São Paulo considerou-se a Avenida Paulista; para o Rio de Janeiro o bairro do Centro, nas proximidades das Avenidas Presidente Vargas e Rio Branco; para Belo Horizonte, a Avenida Amazonas e para Brasília, regiões administrativas de Taguatinga e entorno.

#### 4.5 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os transectos de CO<sub>2</sub>flux e de temperatura de brilho das oito cenas (quatro da estação de chuva e quatro da estação de estiagem) foram exportados para o Excel<sup>®</sup>. Dessa forma, foi possível analisar os transectos e compará-los entre si e em função da sazonalidade.

As análises estatísticas foram divididas em duas partes. Primeiramente, utilizou-se de estatística descritiva no Excel<sup>®</sup> com os cálculos das médias e desvios padrão das variáveis CO<sub>2</sub>flux e temperatura, com isso foi possível a análise dos dados dessas variáveis quanto aos alvos dispostos na mesma cena e também a análise sazonal para as cidades. A segunda parte se deu por meio de estatística inferencial por meio de software BioEstat<sup>®</sup>. Para testar a normalidade dos dados obtidos nos transectos, utilizou-se o método de D'Agostino-Pearson, adotado em conjuntos amostrais superiores a 50 unidades. Nesse método o valor de K<sup>2</sup>

calculado é comparado com valores tabelados da distribuição do  $\chi^2$  (QUI-quadrado) utilizando dados de grau de liberdade e medida de significância. Assim, testou-se a hipótese nula ( $H_0$ ) de que os dados de  $\text{CO}_2$ flux e de temperatura de brilho obtidos nos transectos, tanto para a estação chuvosa como na seca, apresentam distribuição normal. Dessa forma, se o valor calculado for maior ou igual ao tabelado, rejeita-se a hipótese nula e as análises necessitam de testes estatísticos não paramétricos, como o coeficiente de correlação de Kendall ( $\tau$ ), o qual resulta numa medida de correspondência e intensidade de correlação das variáveis (CÂMARA, 2001) e, de acordo com Callegari-Jacques (2003) a avaliação qualitativa da correlação se dá pela Tabela 2:

Tabela 2 – Avaliação Qualitativa da Correlação.  
Positiva

0 = Nula			
			Negativa
<b>0,0 a 0,3</b>	Fraca Positiva	<b>0,0 a -0,3</b>	Fraca Negativa
<b>0,3   a 0,6</b>	Regular ou Moderada Positiva	<b>0,3   a -0,6</b>	Regular ou Moderada Negativa
<b>0,6   a 0,9</b>	Forte Positiva	<b>0,6   a -0,9</b>	Forte Negativa
<b>0,9   a 0,99</b>	Muito Forte Positiva	<b>0,9   a -0,99</b>	Muito Forte Negativa
<b>1</b>	Plena ou Perfeita Positiva	<b>-1</b>	Plena ou Perfeita Negativa

#### 4.6 FATIAMENTO DAS IMAGENS

A coloração da imagem implica na definição de intervalos de cores de acordo com o dado analisado, por exemplo, numa imagem termal. Essa técnica é possível por meio da ferramenta *Density Slice* para a aplicação nas imagens. Primeiramente foi feita a análise dos máximos e mínimos de temperatura das quatro cidades em suas duas estações e em seguida a escolha de um conjunto de intervalos de temperatura para todas as cidades, de modo a estabelecer um padrão.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os primeiros resultados obtidos são as imagens com os processamentos aplicados conforme explicitado nos métodos, sendo que apenas nas imagens de CO<sub>2</sub>flux e Temperatura de Brilho há a aplicação do transecto.

As imagens de NDVI, sPRI e CO<sub>2</sub>flux apresentam cores mais claras as quais representam áreas fotossinteticamente ativas, enquanto que os pixels mais escuros demonstram áreas com menor atividade fotossintética como área urbana. A temperatura de brilho tem alvos mais claros o que corresponde a temperaturas mais elevadas.

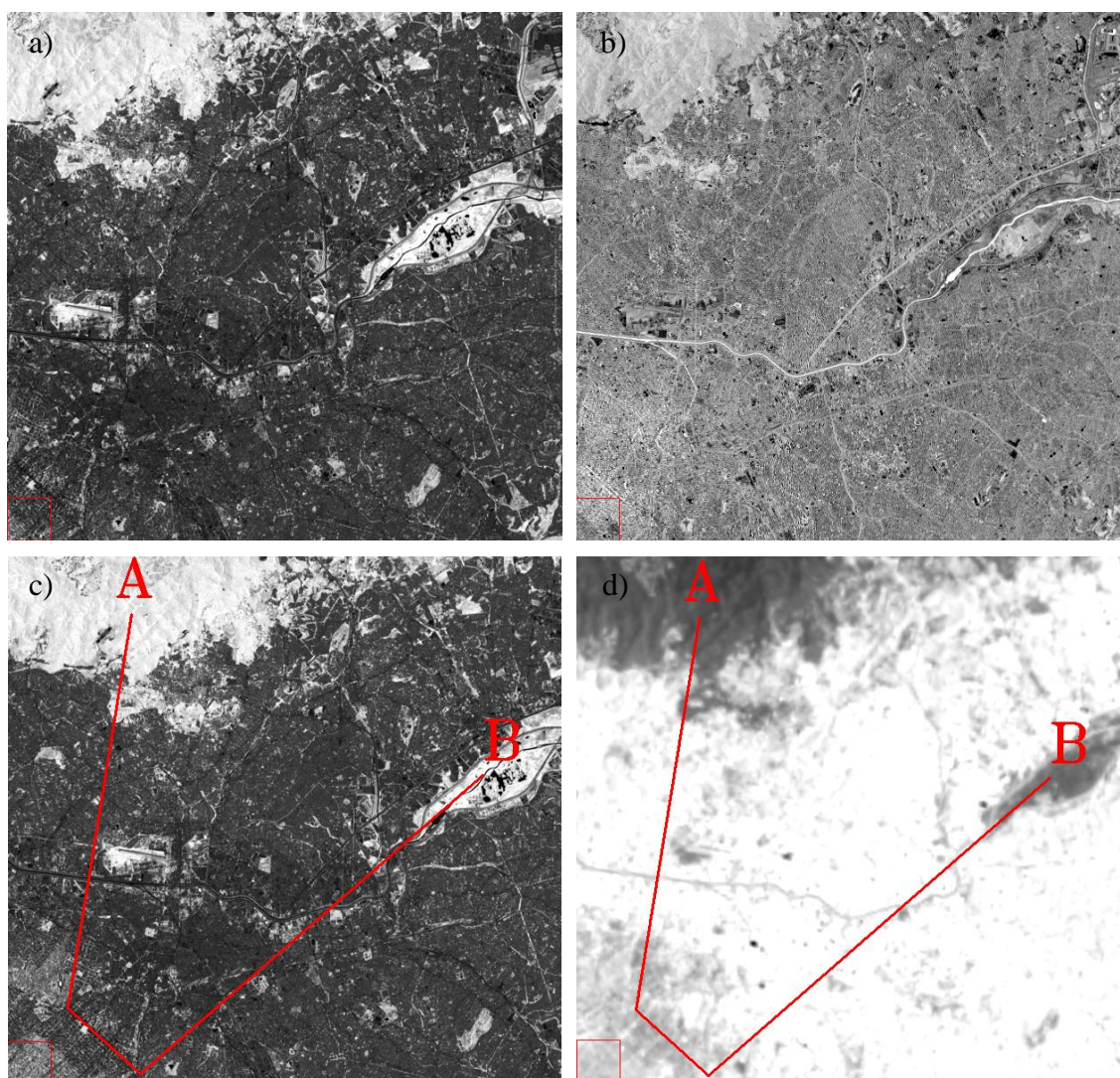


Figura 15 – a) NDVI; b) sPRI; c) CO<sub>2</sub>flux; e d) Temperatura de Brilho da cidade de São Paulo. Imagens da estação chuvosa.



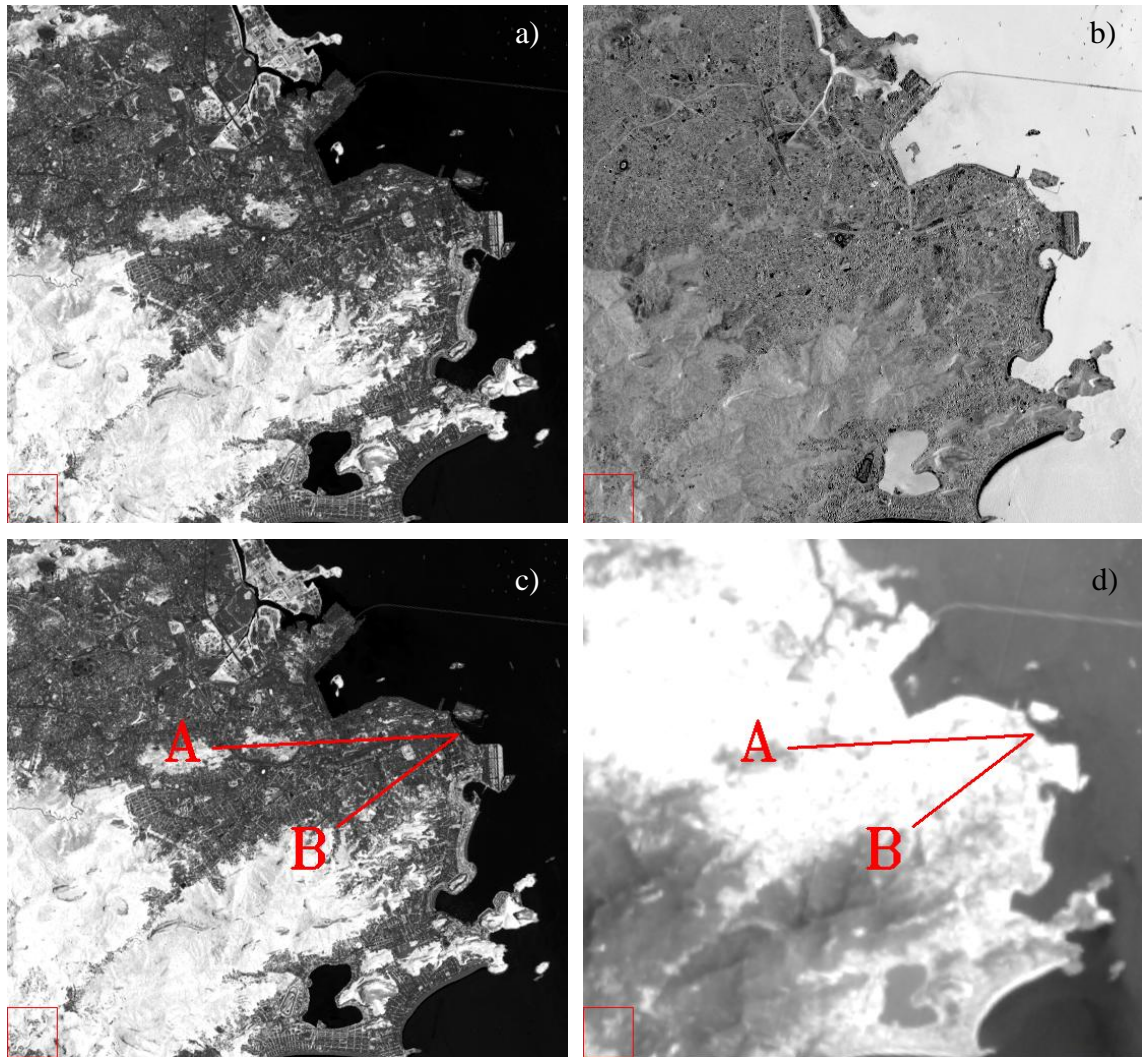


Figura 16 – a) NDVI; b) sPRI; c) CO<sub>2</sub>flux; e d) Temperatura de Brilho da cidade do Rio de Janeiro. Imagens da estação chuvosa.



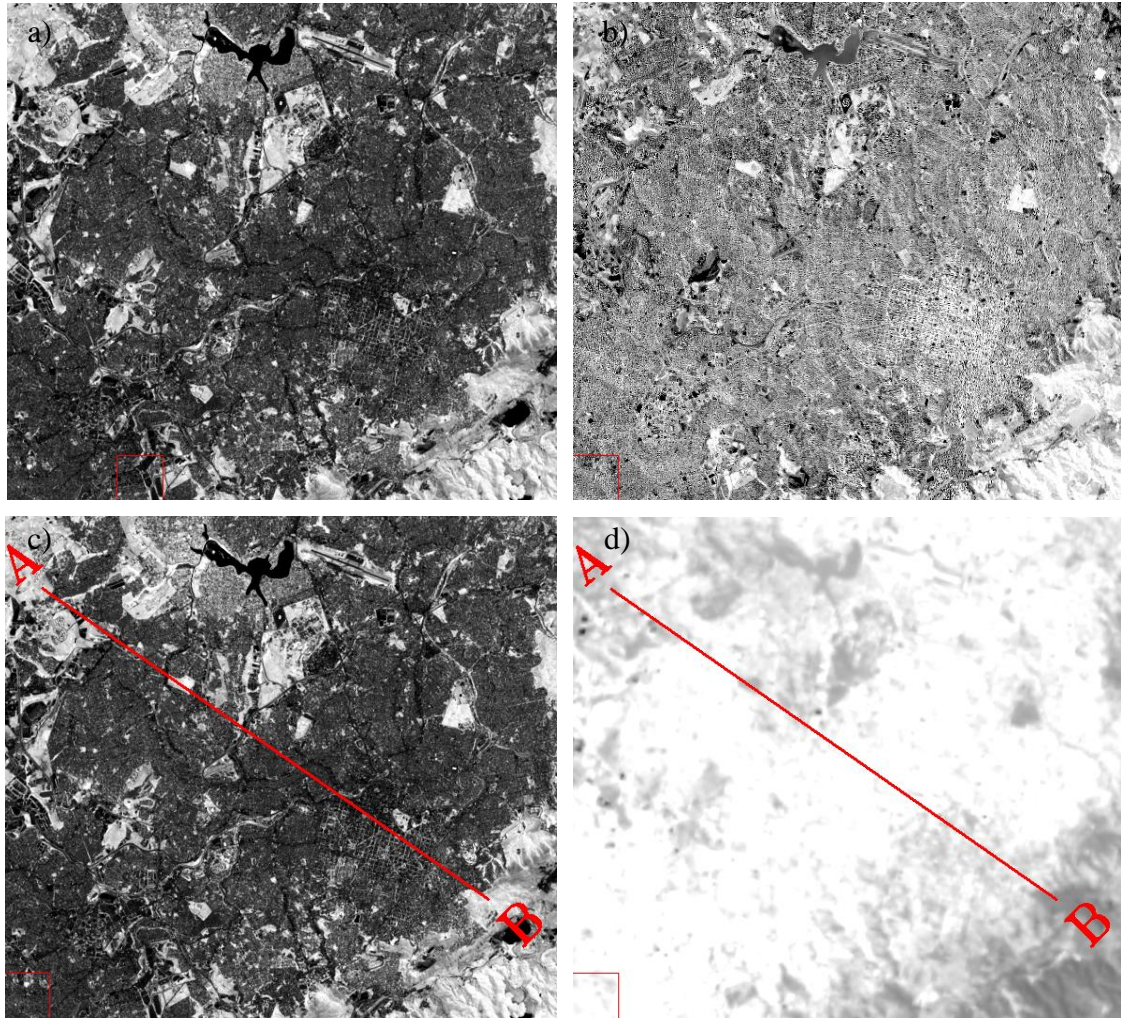


Figura 17 – a) NDVI; b) sPRI; c) CO<sub>2</sub>flux; e d) Temperatura de Brilho da cidade de Belo Horizonte. Imagens da estação chuvosa.

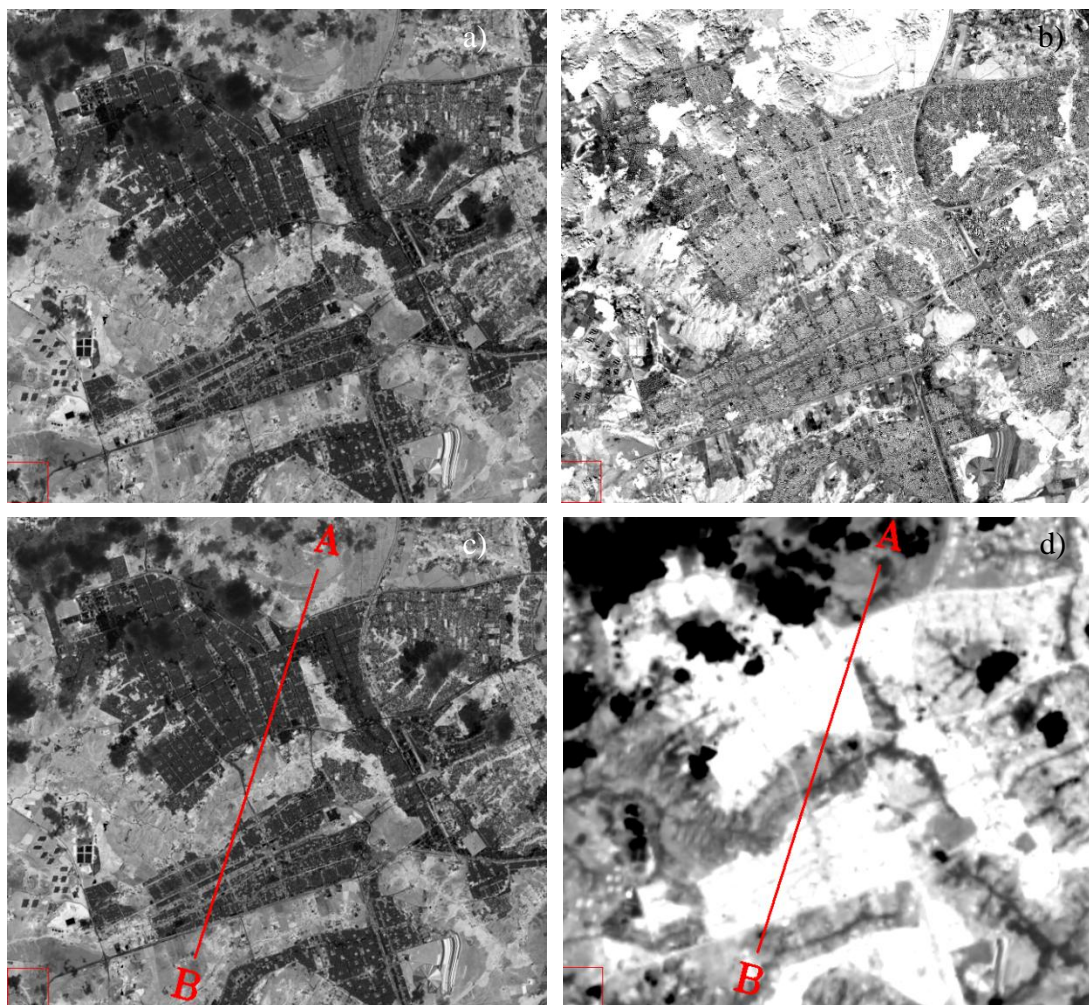


Figura 18 – a) NDVI; b) sPRI; c) CO<sub>2</sub>flux; e d) Temperatura de Brilho da cidade de Brasília. Imagens da estação chuvosa.

Observando os resultados dos transectos aplicados em cada uma das quatro cidades abordadas, é possível perceber que houve uma variação no sequestro de carbono entre as estações de estiagem e chuvosa para todas as cidades analisadas. Em áreas cuja presença de vegetação é mínima percebe-se uma interferência pouco representativa da sazonalidade, com valores de CO<sub>2</sub>flux chegando a zero em determinados pixels das quatro cidades. Isso está relacionado a uma menor quantidade de árvores na composição paisagística de determinadas áreas das metrópoles, ou ainda, em um fluxo mais intenso e irregular de urbanização, o que resulta na supressão dos vestígios remanescentes de vegetação. Já as áreas com predomínio de vegetação os efeitos da sazonalidade são claramente evidenciados, sendo possível constatar um maior sequestro de carbono na estação úmida em detrimento da estação de estiagem.



De modo geral, ao se analisar o comportamento da temperatura frente à sazonalidade, todas as figuras, com exceção da cidade de Belo Horizonte, apresentam gráficos com temperaturas mais elevadas na estação chuvosa, quando comparadas à estação de estiagem. Isso pode ser explicado pelo fato de as imagens da estação de estiagem compreender o período de julho a setembro, que corresponde ao inverno e início da primavera, onde as temperaturas encontram-se mais amenas. No caso das imagens da estação chuvosa, todas as cidades compreendem o período do verão, onde as temperaturas caracterizam-se por serem mais elevadas. Apenas a imagem da cidade de Belo Horizonte compreende o período do outono.

Para todas as cidades os gráficos que relacionam as variáveis mostraram uma relação inversa entre sequestro de carbono e temperatura, independente da estação. Na faixa de pixels correspondente a área urbanizada, o sequestro de carbono diminui enquanto que a temperatura aumenta. Uma vez que a vegetação é a principal responsável pelo sequestro de carbono presente na atmosfera, e como o processo de urbanização envolve a supressão da vegetação, essa relação ficou bem evidenciada.

## 5.1 SÃO PAULO

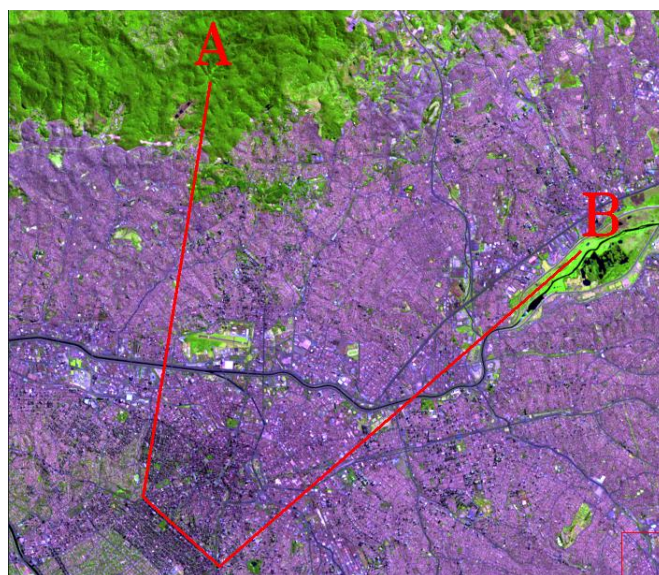


Figura 19 – Transecto aplicado na imagem de São Paulo.

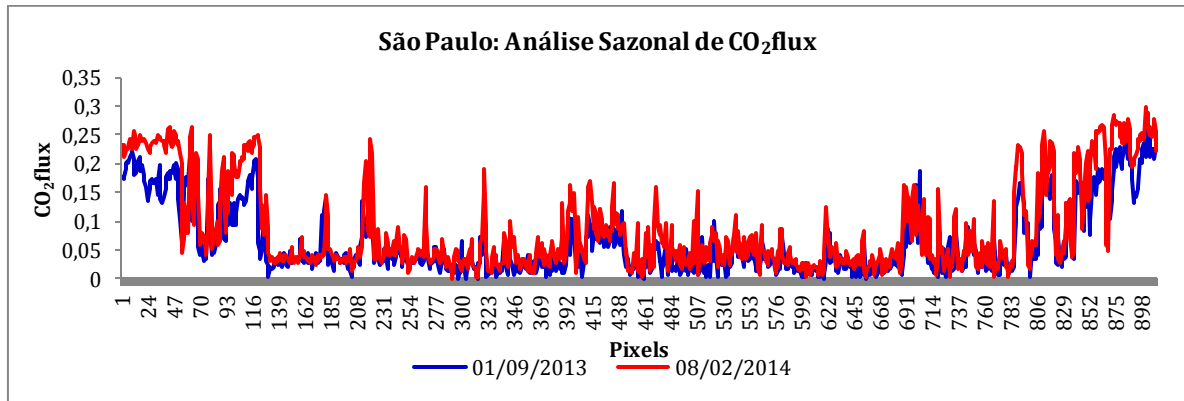


Figura 20 – transecto do sequestro de carbono em função da sazonalidade na cidade de São Paulo.

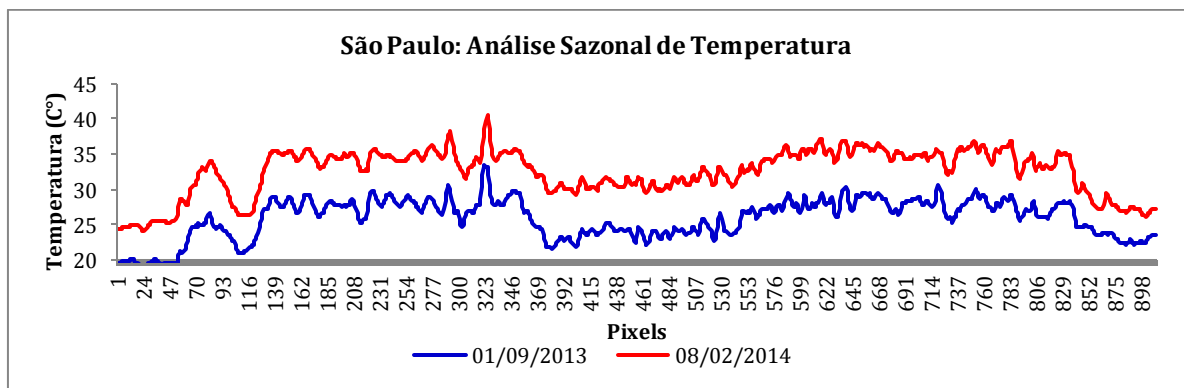
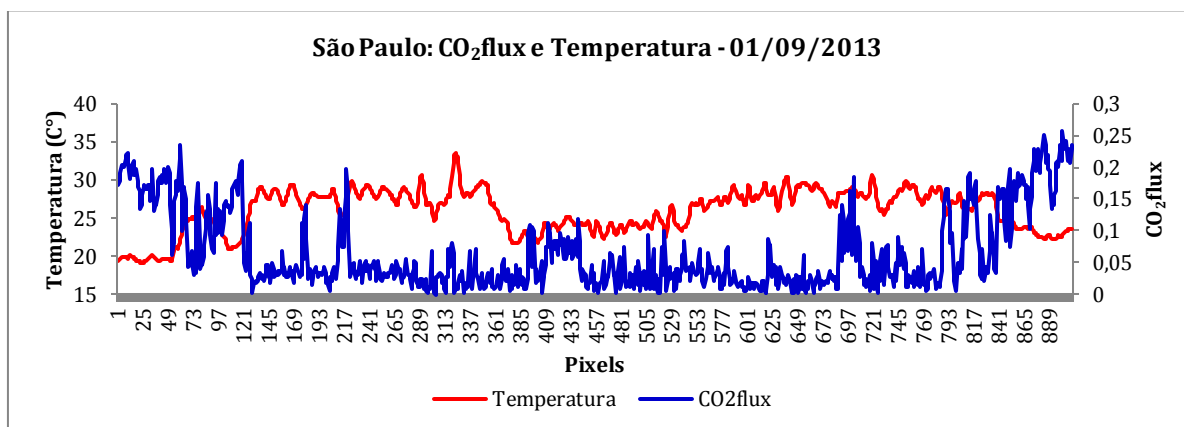


Figura 21 – transecto da temperatura em função da sazonalidade na cidade de São Paulo

Os valores de  $\text{CO}_2\text{flux}$  se mostraram baixos para a cidade de São Paulo, tanto na estação seca quanto na estação úmida, o que caracteriza uma variação mínima do sequestro florestal de carbono em função da sazonalidade. Já com relação à temperatura, a sazonalidade exerceu uma forte influência, apresentando valores de temperatura mais elevados na estação úmida.



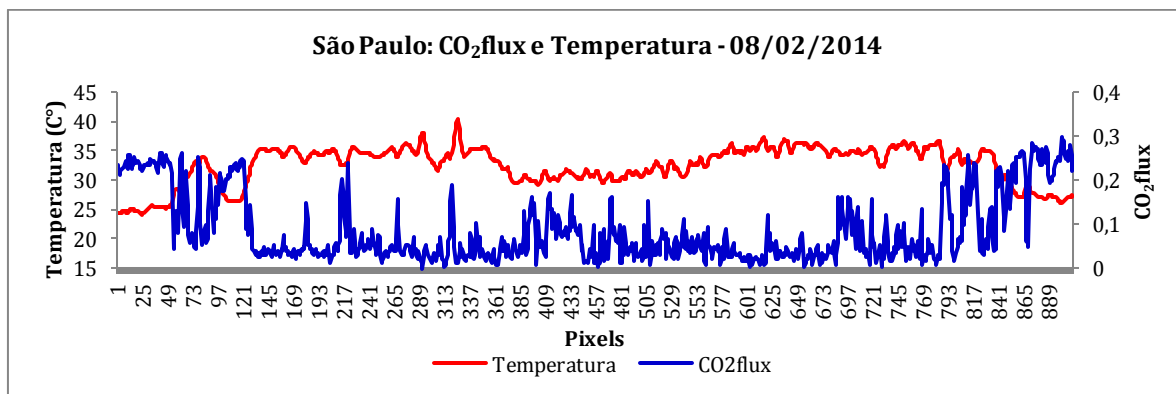


Figura 22 – Gráficos demonstrando a relação entre CO<sub>2</sub>flux e Temperatura da cidade de São Paulo para as estações seca e úmida, respectivamente.

A relação entre sequestro de carbono e temperatura para a cidade de São Paulo se mantém inversa, sendo que nesse caso, a temperatura determina a amplitude dessa variação, em que nos dois períodos analisados há uma diferença de aproximadamente 7°C nos valores máximos de temperatura.

Com a rápida expansão da Região Metropolitana de São Paulo, a partir da década de 50, e com os elevados índices de industrialização da área, a oferta de emprego se elevou, o que, de acordo com Lombardo et al. (2012) desencadeou uma convergência da população para a cidade que, aliada a falta de planejamento estrutural urbano, resultou na substituição de áreas verdes por áreas construídas. Esse intenso processo de urbanização trouxe consigo altos índices de poluição, os quais exerceram forte pressão sobre o ecossistema urbano. Isso resultou em mudanças consideráveis nos fluxos pluviais de drenagens, causando enchentes devido à impermeabilização e canalização, assim como a diminuição da umidade relativa do ar, acarretando, assim, no aumento da temperatura, caracterizando o fenômeno de ilhas de calor (LOMBARDO, 1985).

Esse fenômeno foi sendo agravado pelo elevado índice de calor irradiado pelas edificações, o que também resultou num impacto negativo na saúde da população. Ainda de acordo com Lombardo et al. (2012), a escassez da mata ciliar devido à ocupação dessas regiões, que eram inicialmente destinadas à preservação, fez com que houvesse uma aceleração no processo de assoreamento de rios e mananciais, contribuindo para a fragilização do sistema de abastecimento da cidade, o que fez com que restassem poucos fragmentos de vegetação remanescentes sem qualquer tipo de alteração.

A Tabela 3 apresenta o teste de hipótese de D'Agostino-Pearson para verificação da normalidade dos dados.

Tabela 3 – Resultados do teste de hipótese para a cidade de São Paulo.

Variável/Estação	K <sup>2</sup>	$\chi^2$ tabelado	Hipótese
CO <sub>2</sub> flux/seca	19.1724	13.816	Rejeita H0
Temperatura/seca	8.56		
CO <sub>2</sub> flux/úmida	16.2619		Rejeita H0
Temperatura/úmida	10.6399		

São Paulo apresentou valores de K<sup>2</sup> maior do  $\chi^2$  (QUI-quadrado) tabelado, o que implica na rejeição da hipótese nula, ou seja, os dados não estão numa distribuição normal e, portanto, será necessário o uso de estatística não paramétrica para a análise de correlação desses dados. Neste ponto analisa-se a relação entre CO<sub>2</sub>flux e Temperatura de acordo com cada estação, assim sendo, por mais que alguns dados desse par obtenham dados abaixo do  $\chi^2$  (QUI-quadrado) tabelado, basta apenas um deles apresentar valores iguais ou maiores ao  $\chi^2$  que a hipótese já pode ser definida como alternativa, ou seja, rejeita-se H0.

Tabela 4 – Resultados do coeficiente de correlação de Kendall para a cidade de São Paulo e suas estações.

	Estação	$\tau$ (TAUxy)
São Paulo	Estiagem	-0.3381
	Chuvosa	-0.4514

Os resultados obtidos pelo coeficiente de correlação de Kendall demonstram a correlação inversa dos resultados, o que significa que enquanto há o acréscimo de uma variável, haverá o decréscimo da outra.

Para São Paulo os valores variaram de -0.3381 a -0.4514 entre as estações, o que implica numa correlação regular ou moderada negativa para ambas de acordo com a Tabela 2.

## 5.2 RIO DE JANEIRO

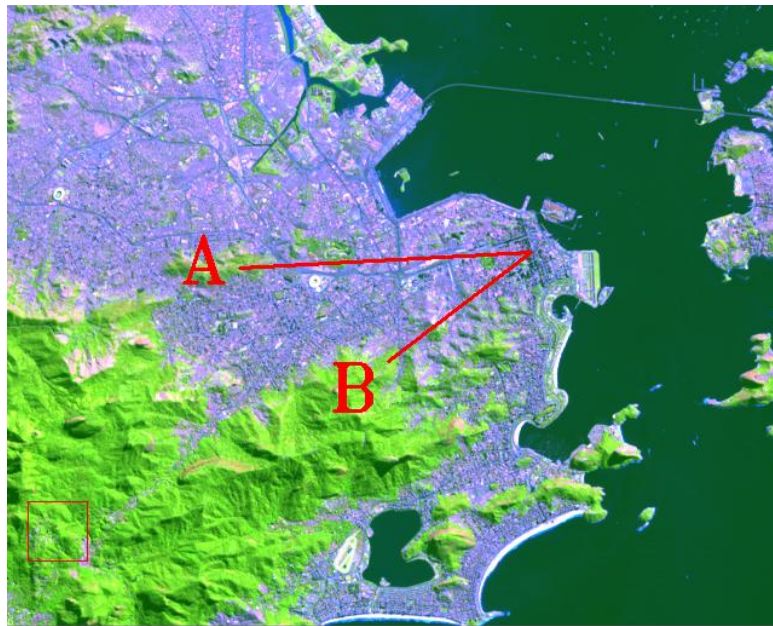


Figura 23 – Transecto aplicado na imagem do Rio de Janeiro.

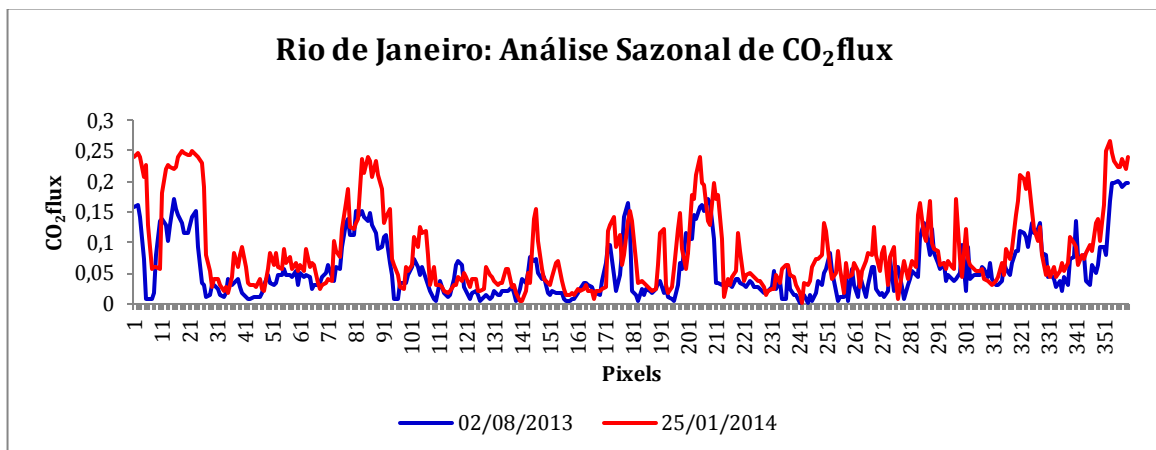


Figura 24 – Gráfico demonstrando a variação do sequestro de carbono em função da sazonalidade na cidade do Rio de Janeiro.

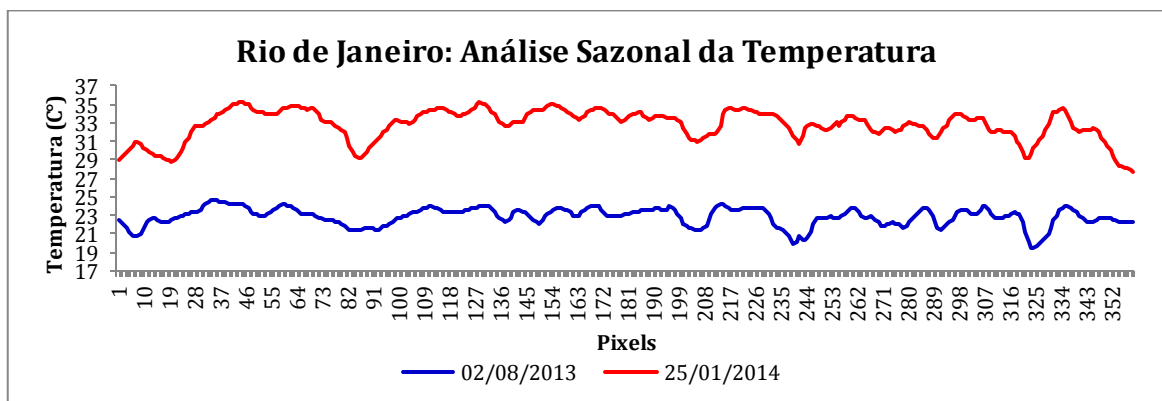


Figura 25 – Gráficos demonstrando a variação da temperatura em função da sazonalidade na cidade do Rio de Janeiro.

O sequestro florestal de carbono para a cidade do Rio de Janeiro, se comparado à cidade de São Paulo, apresenta uma maior variação em função da sazonalidade. Entretanto, essa variação fica mais evidente em áreas com predomínio de vegetação. No caso da temperatura, o mesmo padrão observado para a cidade de São Paulo se manteve, com temperaturas mais elevadas na estação úmida e temperaturas menores na estação seca.

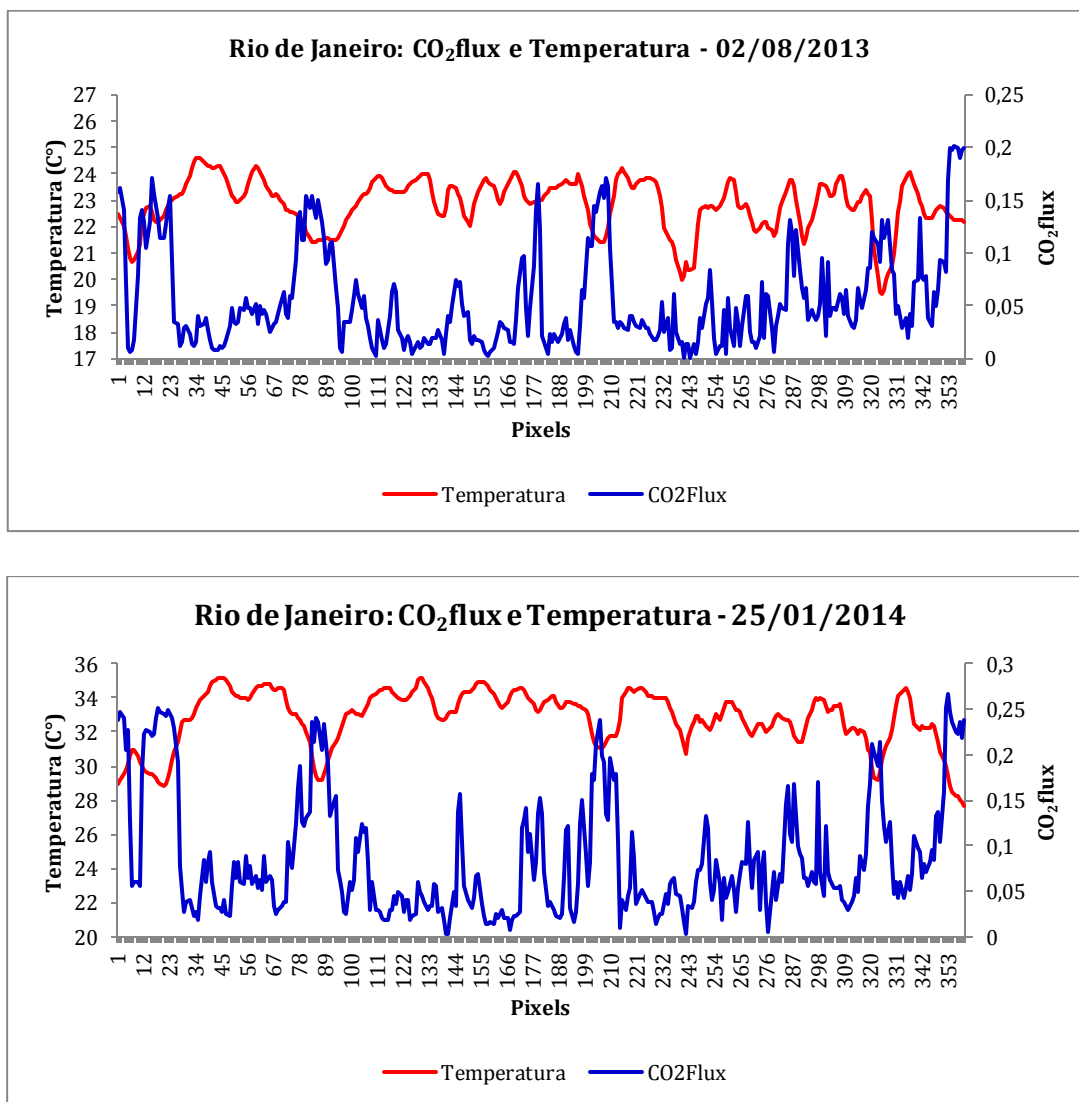


Figura 26 – Gráficos demonstrando a relação entre CO<sub>2</sub>flux e Temperatura da cidade do Rio de Janeiro para as estações seca e úmida, respectivamente.

A relação entre CO<sub>2</sub>flux e temperatura para a cidade do Rio de Janeiro se mantém inversa. Apesar de a cidade de São Paulo ter apresentado maiores registros de temperatura, no Rio de Janeiro observou-se uma maior variação na amplitude dos valores de temperatura, chegando a uma diferença de até 10°C nos valores máximos de temperatura.



De acordo com dados da Fundação SOS Mata Atlântica do ano de 2012, o município do Rio de Janeiro apresenta apenas 18% remanescente da cobertura da Mata Atlântica, o equivalente a 18.394 hectares. Ao se observar a Figura 19 é possível verificar uma elevada concentração de vegetação nas áreas de domínio do Parque Nacional da Tijuca, sendo que a área de fato encoberta pelo transecto, cuja intensidade de ocupação é bastante elevada, apresenta uma quantidade muito reduzida de áreas verdes, fato esse bastante evidenciado nos gráficos.

Tabela 5 – Resultados do teste de hipótese para a cidade do Rio de Janeiro.

Variável/Estação	K <sup>2</sup>	$\chi^2$ tabelado	Hipótese
CO <sub>2</sub> flux/seca	22.1165	13.816	Rejeita H0
Temperatura/seca	15.526		
CO <sub>2</sub> flux/úmida	16.2182		Rejeita H0
Temperatura/úmida	12.549		

O Rio de Janeiro também apresentou valores de K<sup>2</sup> acima do  $\chi^2$  (QUI-quadrado) tabelado, o que implica na rejeição da hipótese nula, ou seja, os dados não estão numa distribuição normal.

Tabela 6. Resultados do coeficiente de correlação de Kendall para a cidade do Rio de Janeiro e suas estações.

	Estação	$\tau$ (TAUxy)
Rio de Janeiro	Estiagem	-0.2742
	Chuvosa	-0.4413

O Rio de Janeiro apresentou valores entre -0.2742 e -0.4413, correlações estas consideradas, de acordo com a Tabela 2, fraca negativa para a estação de estiagem e regular ou moderada negativa para a estação chuvosa.

### 5.3 BELO HORIZONTE

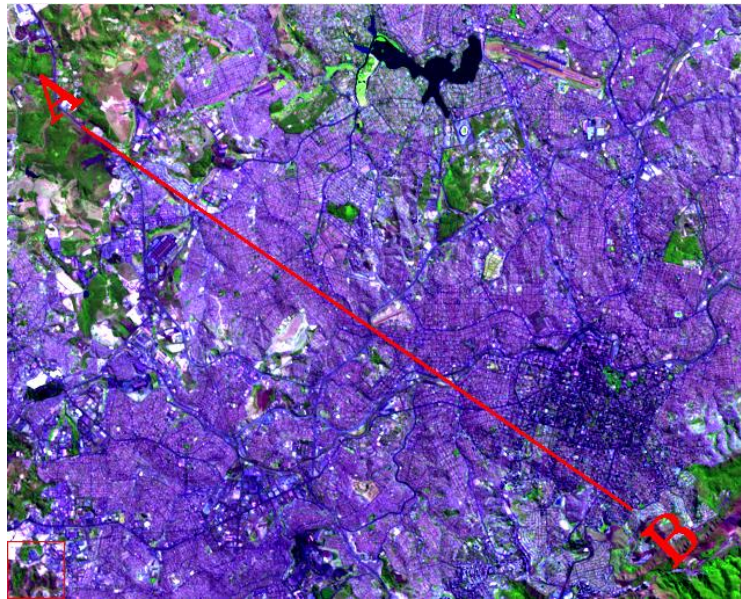


Figura 27 – Transecto aplicado na imagem de Belo Horizonte.

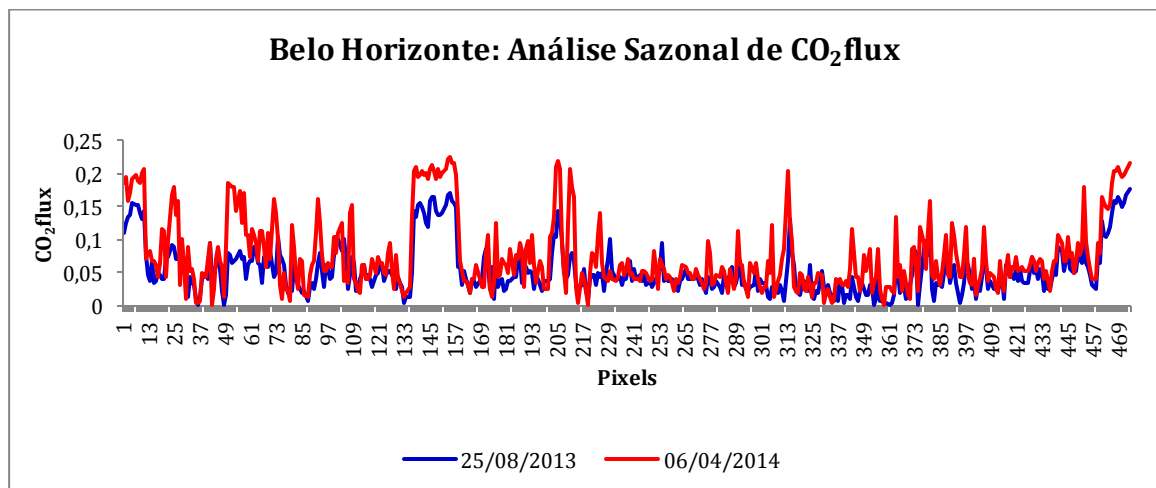


Figura 28 – Gráfico demonstrando a variação do sequestro de carbono em função da sazonalidade na cidade de Belo Horizonte.

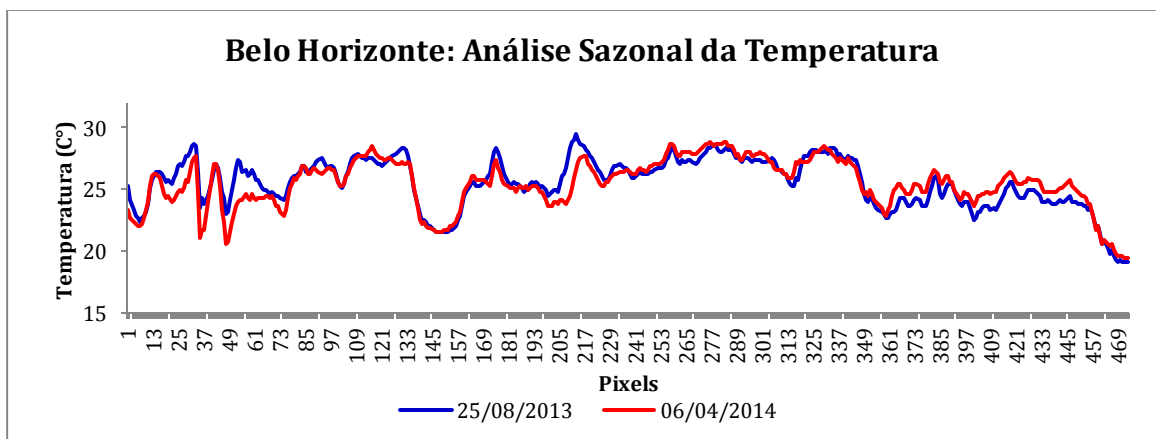


Figura 29 – Gráficos demonstrando a variação da temperatura em função da sazonalidade na cidade de Belo Horizonte.

O comportamento do CO<sub>2</sub>flux em Belo Horizonte demonstrou um padrão similar às cidades de São Paulo e do Rio de Janeiro, com uma baixa variação em função da sazonalidade.

O gráfico da cidade de Belo Horizonte apresentou comportamento bastante particular, com variações de temperatura bem menores em função da sazonalidade em toda a faixa encoberta pelo transecto. Esse fato pode ser explicado pela ocorrência de um evento de chuvas de grande intensidade na cidade, o qual atingiu níveis pluviométricos 130% acima da média mensal histórica (Clima Tempo, abril/2014). Essa chuva exerceu forte influência na temperatura local e o comportamento do histograma é também explicado devido ao fato da imagem de estação chuvosa de Belo Horizonte corresponder ao mês de abril, ou seja, mudando o padrão de imagens de verão (janeiro e fevereiro) das outras cidades e se enquadrando na estação do outono, a qual apresenta temperaturas mais amenas.

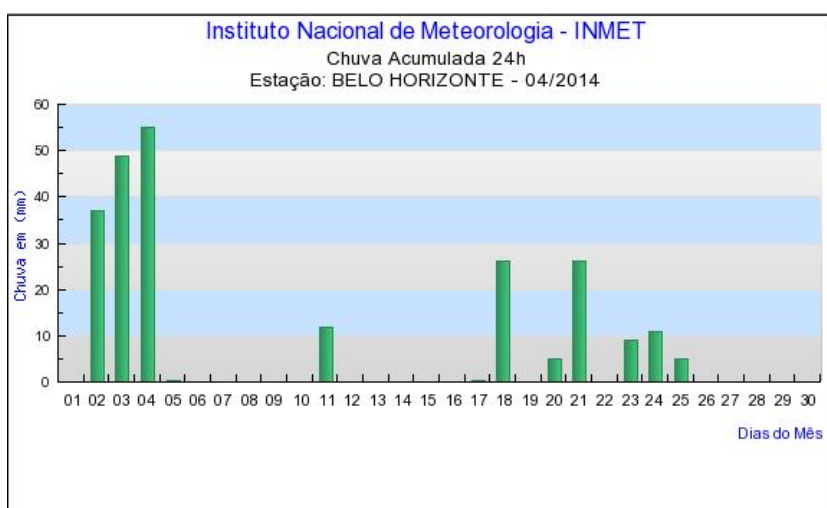
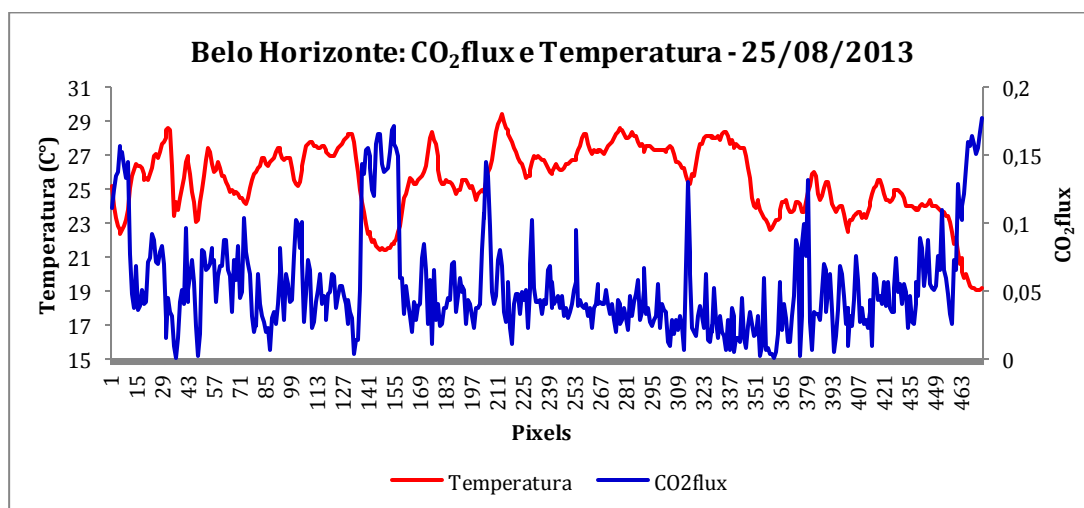


Figura 30 – Chuva acumulada em 24h do mês de abril de 2014 na cidade de Belo Horizonte demonstrando a peculiaridade das chuvas do início desse mês.

Fonte: INMET



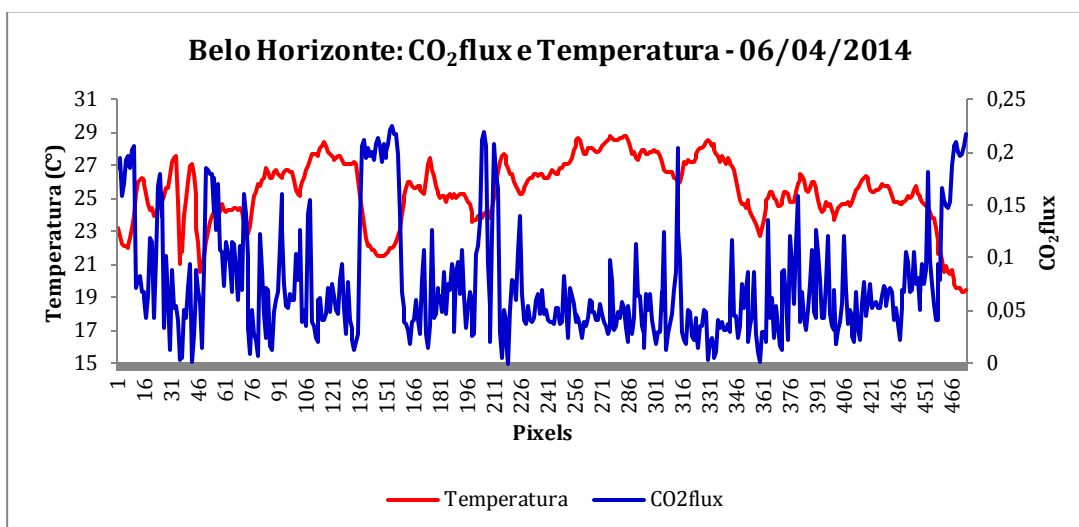


Figura 31 – Gráficos demonstrando a relação entre CO<sub>2</sub>flux e Temperatura da cidade de Belo Horizonte para as estações seca e úmida, respectivamente.

A cidade de Belo Horizonte, assim como outras grandes metrópoles brasileiras, sofreu intensas modificações ao longo da história em termos de modificação na estrutura de sua paisagem natural em detrimento do intenso processo de ocupação territorial, o que levou à intensificação do fenômeno de ilhas de calor. Na década de 1920, a cidade chegou a ser conhecida pelo nome de Cidade Jardim, em referência à presença de vegetação como uma característica predominante na composição da paisagem local. A partir dos anos 40, com a entrada de Juscelino Kubitschek na prefeitura da cidade, a mesma passou a sofrer um processo de modernização, com a construção de diversas obras arquitetônicas. Entretanto, foi a partir da década de 60 que, de acordo com Magalhães Filho (2006), a cidade passa por uma fase intensa de crescimento, onde casas eram demolidas para dar lugar aos arranha-céus, o que resultou na derrubada de árvores e na pavimentação do solo.

Nas décadas seguintes, a degradação ambiental passou se intensificar ainda mais, como resultado direto do processo de urbanização, criando, de acordo com Magalhães Filho (2006) um “impacto ambiental de natureza térmica” na área urbana da cidade, o que fez com que a ilha de calor de Belo Horizonte gerasse uma pluma de contaminação térmica ao longo da região metropolitana da cidade, especialmente em direção aos municípios de Betim e Contagem.

Tabela 7 – Resultados do teste de hipótese para a cidade de Belo Horizonte.

Variável/Estação	K <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup> tabelado	Hipótese
CO <sub>2</sub> flux/seca	39.1746	13.816	Rejeita H0
Temperatura/seca	9.9829		
CO <sub>2</sub> flux/úmida	20.1545		Rejeita H0

<b>Temperatura/úmida</b>	9.4516		
--------------------------	--------	--	--

Em Belo Horizonte houve um  $K^2$  acima do  $\chi^2$  (QUI-quadrado) tabelado, o que implicou na rejeição da hipótese nula ( $H_0$ ). Assim, os dados não estão numa distribuição normal.

Tabela 8 – Resultados do coeficiente de correlação de Kendall para a cidade de Belo Horizonte e suas estações.

	<b>Estação</b>	<b><math>\tau</math> (TAUxy)</b>
<b>Belo Horizonte</b>	Estiagem	-0.2362
	Chuvosa	-0.343

Belo horizonte, assim como o Rio de Janeiro, apresentou correlação diferenciada entre suas estações. De acordo com a Tabela 2, para a estação de estiagem a correlação resultou em -0.2362, considerada fraca negativa, enquanto que para a estação chuvosa o valor é de -0.343, implicando numa correlação regular ou moderada negativa.

#### 5.4 BRASÍLIA

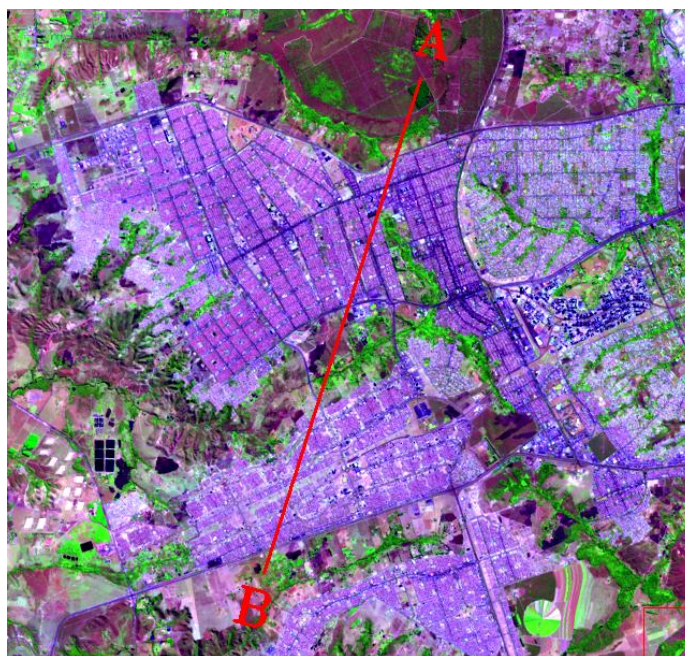


Figura 32 – Transecto aplicado na imagem de Brasília.

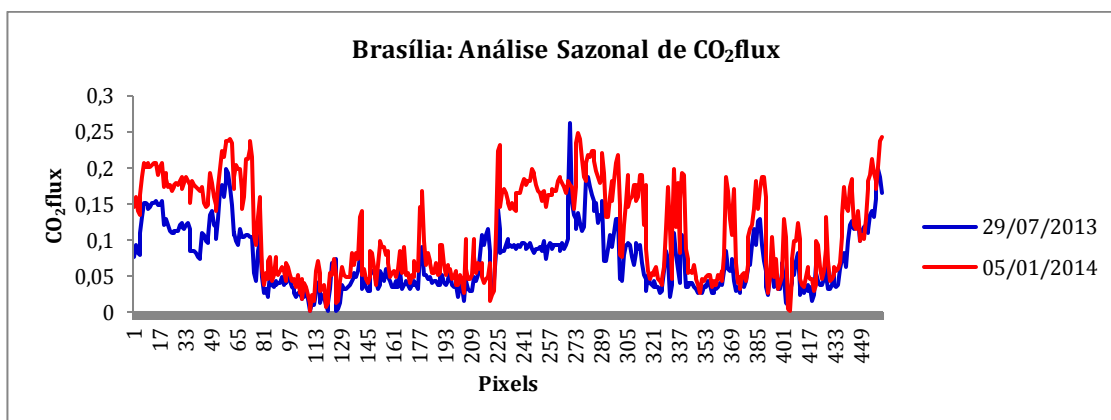


Figura 33 – Gráfico demonstrando a variação do sequestro de carbono em função da sazonalidade na cidade de Brasília.

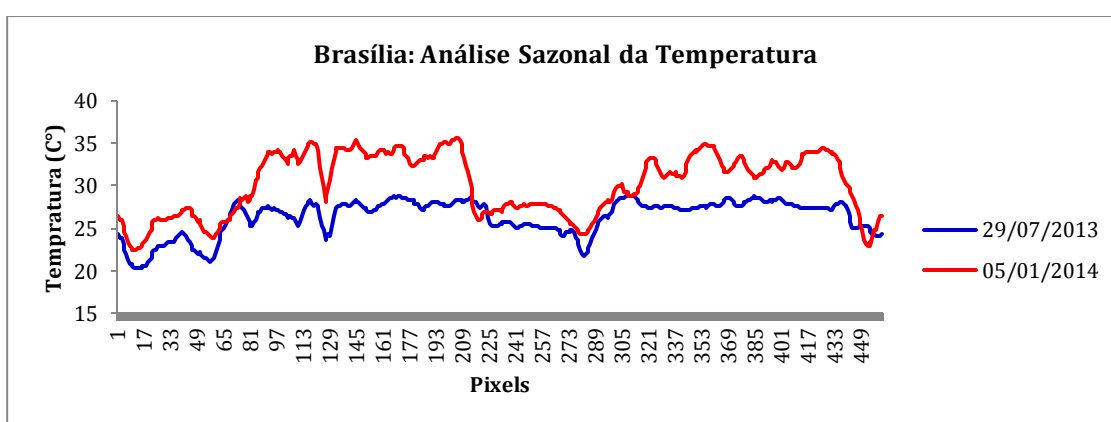


Figura 34 – Gráficos demonstrando a variação da temperatura em função da sazonalidade na cidade de Brasília.

A variação do  $\text{CO}_2\text{flux}$  na cidade de Brasília foi claramente evidenciada pela diferença entre as estações, fazendo com que a amplitude da variação do sequestro florestal de carbono para Brasília seja superior às demais cidades, com média de 0,073 e 0,113 para as estações de estiagem e chuvosa, respectivamente.

A variabilidade sazonal da cidade de Brasília vai de acordo com as observações realizadas por Terra-Oliveira e Baptista (2014), em que na estação de chuva (janeiro) o sequestro de carbono é maior devido à vegetação mais vigorosa e na estação seca (setembro) há uma redução do sequestro de carbono devido ao período de estiagem onde a vegetação não se encontra mais tão vigorosa e sua capacidade de sequestro é reduzida, característica típica do bioma Cerrado. Ainda assim é visível a grande diferenciação dos alvos, principalmente da urbana que prova o fato da supressão vegetal ser um problema em grandes centros urbanos.

Já com relação à temperatura, ainda que em menor escala, é possível verificar a influência da sazonalidade.



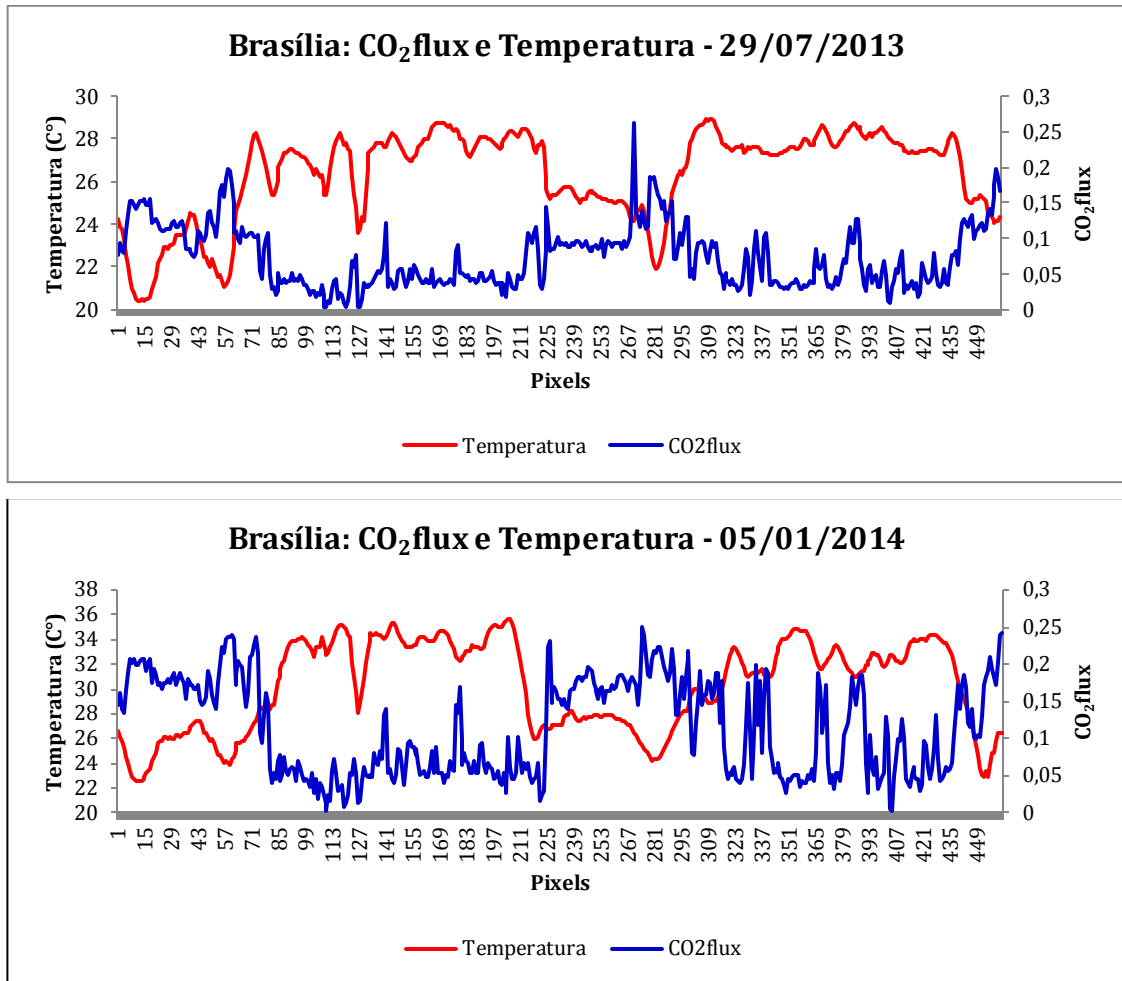


Figura 35 – Gráficos demonstrando a relação entre CO<sub>2</sub> flux e Temperatura da cidade de Brasília para as estações seca e úmida, respectivamente.

A relação entre sequestro de carbono e temperatura, assim como nas demais cidades se mantém inversa, sendo que para Brasília apresentou intervalo de aproximadamente 4°C entre as estações e, portanto, com uma amplitude menor comparada às cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.

As Regiões Administrativas de Brasília têm um histórico peculiar ao serem comparadas com municípios periféricos de outras regiões metropolitanas brasileiras. Taguatinga foi a primeira região administrativa projetada em 1958 no intuito de proteger o Plano Piloto de invasões e ocupações irregulares no geral, assim, houve a necessidade de uma crescente criação de novas cidades para esse fim, as chamadas cidades satélites (PAVIANI, 2009). Taguatinga, Ceilândia e Samambaia compõem a maior parte da população brasiliense, tendo atingido 750 mil habitantes juntas, de acordo com o censo de 2000.

Tabela 9 – Resultados do teste de hipótese para a cidade de Brasília.

Variável/Estação	K <sup>2</sup>	$\chi^2$ tabelado	Hipótese
CO <sub>2</sub> flux/seca	9.8186	13.816	Rejeita H0
Temperatura/seca	15.6373		
CO <sub>2</sub> flux/úmida	16.5488		Rejeita H0
Temperatura/úmida	15.4948		

Os dados de Brasília, assim como das demais cidades, não apresentaram distribuição normal, devido à rejeição da hipótese nula (H0), resultando num K<sup>2</sup> acima do  $\chi^2$  (QUI-quadrado) tabelado.

Tabela 10 – Resultados do coeficiente de correlação de Kendall para a cidade de Brasília e suas estações.

	Estação	$\tau$ (TAUxy)
Brasília	Estiagem	-0.3653
	Chuvosa	-0.563

A cidade de Brasília demonstrou uma maior variação entre os coeficientes de correlação de suas estações havendo um intervalo de 0.20 entre elas. Isso se dá devido à maior redução da evapotranspiração<sup>1</sup> do extrato herbáceo em relação às outras cidades, característica do bioma Cerrado para essa estação. Os coeficientes implicam, de acordo com a Tabela 2, numa correlação regular ou moderada negativa para ambas as estações.

<sup>1</sup> Evapotranspiração: É a junção dos termos evaporação e transpiração. “A evaporação é o movimento de moléculas de água livres que se afasta de uma superfície úmida até a atmosfera menos saturada, enquanto a transpiração é o movimento da água através da planta que volta para a atmosfera, as quantidades de água transpirada podem ser significativas: em um dia quente, uma única árvore pode transpirar centenas de litros de água; uma floresta, milhões de litros” (CHRISTOPHERSON, 2012).



A Tabela 11 apresenta os resultados da estatística descritiva com valores mínimos e máximos observados para cada cidade, nas estações seca e chuvosa, bem como suas respectivas médias e desvios padrão, compreendendo a faixa de pixels abrangida pelos transectos correspondentes a cada área.

Tabela 11 – Variação de CO<sub>2</sub>flux e Temperatura em função da sazonalidade, na faixa de pixels abrangida pelos transectos.

	CO <sub>2</sub> flux				Temperatura (°C)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média	Desvio Padrão	Mínima	Máxima	Média	Desvio Padrão
<b>São Paulo – SECA</b>	0	0,257	0,065	0,061	19,1	33,5	25,8	2,8
<b>São Paulo – ÚMIDA</b>	0	0,297	0,087	0,078	24,2	40,4	32,4	3,2
<b>Rio de Janeiro – SECA</b>	0	0,201	0,055	0,046	19,4	24,6	22,8	0,9
<b>Rio de Janeiro – ÚMIDA</b>	0,002	0,267	0,086	0,066	27,6	35,1	32,7	1,66
<b>Belo Horizonte – SECA</b>	0	0,177	0,054	0,037	19,0	29,4	25,5	2,0
<b>Belo Horizonte – ÚMIDA</b>	0	0,226	0,075	0,054	19,3	28,8	25,4	1,9
<b>Brasília – SECA</b>	0,002	0,262	0,073	0,043	20,3	28,9	26,3	2,1
<b>Brasília – ÚMIDA</b>	0,002	0,249	0,113	0,064	22,5	35,6	30,2	3,6

A crescente urbanização dos centros, normalmente não planejada, acarreta consequentemente em taxas altíssimas de supressão vegetal, principalmente em locais com grande concentração demográfica e assentamentos informais. Assim, pode-se relacionar o impacto da supressão vegetal a “alterações no microclima, elevação da temperatura, alterações no regime de chuvas, alagamentos devido à falta de superfícies permeáveis e outros que competem à qualidade de vida e à saúde pública” (COPQUE et al., 2011).

De acordo com Laera (2007) apesar das florestas urbanas estocarem menos carbono por hectare em árvores, o estoque e o sequestro de carbono por unidade de árvore urbana pode ser maior do que em extratos florestais. Esse fato ocorre principalmente pela quantidade de árvores de maior porte nesses centros urbanos devido à estrutura urbana mais aberta e à possibilidade de maior taxa de crescimento (NOWAK, 1994).

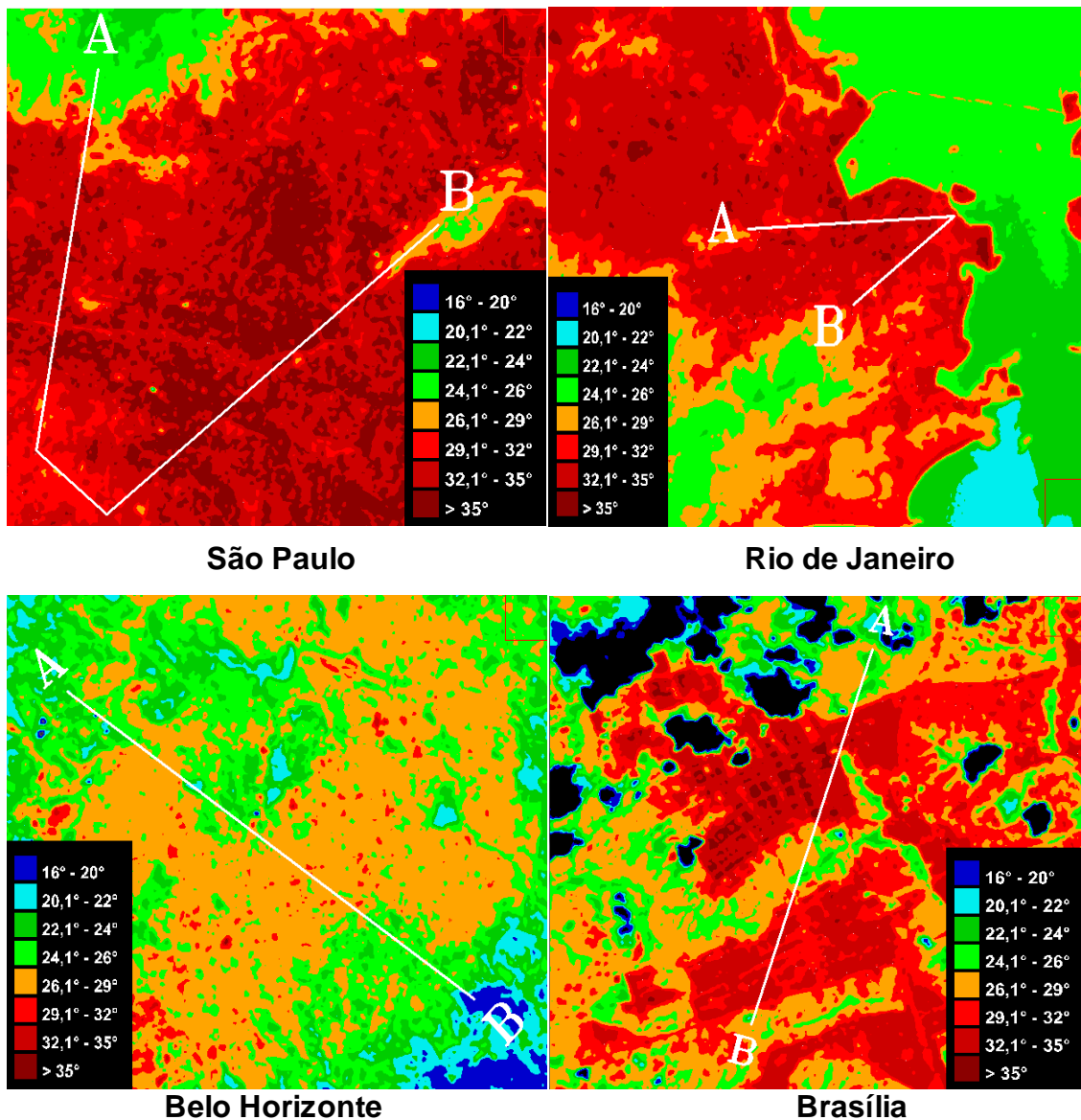


Figura 36 – Variação de temperatura para as quatro cidades (Fatiamento) da estação chuvosa.

Observando as imagens apresentadas na Figura 32, percebe-se claramente a diferença entre o padrão de ocupação entre as cidades. Nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro predominam temperaturas acima de 35°C, de modo geral. Enquanto que nas cidades de Brasília e Belo Horizonte, que apesar da ocupação intensa, apresentam registros de temperatura menores que as duas primeiras, sendo que no caso de Belo Horizonte, as temperaturas são ainda menores, em função do evento histórico de precipitação mencionado anteriormente.

Ainda de acordo com a Figura 32, as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, as quais são consideradas as duas maiores cidades brasileiras, apresentaram padrão de ocupação com maior intensidade na área urbana, na qual a presença de vegetação em meio aos pavimentos e edificações é mínima. Isso, ao

mesmo tempo que reflete em temperaturas mais elevadas, também reforça a importância do papel da vegetação como reguladora do clima, especialmente em escala local.

A fraca influência da sazonalidade e os altos intervalos de temperatura para a cidade de São Paulo podem ser explicados pela característica diferenciada em relação às outras três cidades. São Paulo está entre as dez cidades mais populosas do mundo, completando nesse ano 21 milhões de habitantes em sua região metropolitana e podendo ser comparada com cidades como Xangai, Cidade do México, Déli, Tóquio e Beijing (ONU, 2014). O trabalho de Youn-Young-Choi et al. (2014) demonstrou variações de temperaturas em Tóquio, Seul e Beijing, as quais apresentam intervalos de até 13°C de diferença, principalmente no verão, dado semelhante ao descrito em São Paulo.

O que explica as elevadas temperaturas nas aglomerações urbanas é o fato de o fenômeno de ilhas de calor estar fortemente associado ao aumento do calor absorvido pelos materiais utilizados na pavimentação e edificações que integram a paisagem urbana. Parte da energia recebida pela superfície terrestre é refletida, e essa refletividade pode ser explicitada pelo albedo, o qual exerce certo controle em relação à absorção e reflexão dessa energia.

A diminuição da temperatura observada em áreas de vegetação, e consequente aumento do sequestro de carbono ocorre devido ao fato de a vegetação afetar o microclima de maneira substancial (MANAHAN, 2013). Em massas vegetais relativamente densas, quase não há circulação do ar na região da superfície, devido aos limites severos impostos pela vegetação contra a convecção e difusão. Grande parte da energia solar é interceptada pela copa das árvores, levando a um aquecimento solar máximo que, de modo geral, ocorre a uma altura considerável em relação ao solo, fazendo com que a região abaixo da copa das árvores mantenha-se a temperaturas relativamente estáveis.

Além disso, de acordo com Manahan (2013), em uma massa vegetal densa, a evaporação a partir da superfície do solo não é responsável pela maior parte da perda de umidade, mas sim a transpiração das folhas das plantas. Com isso, tem-se condições de temperatura e umidade que contribuem para a manutenção de um ambiente favorável à vida para diversos organismos.

Outro aspecto levantado pelo autor demonstra que, em ambientes rurais a vegetação e os corpos hídricos têm efeito moderador, absorvendo níveis modestos

de energia solar e liberando-a lentamente. Já com relação às áreas urbanas, a presença em larga escala de materiais tais como rocha, asfalto, concreto e outros, exerce um efeito oposto, absorvendo quantidades substanciais de energia solar e reirradiando essa energia para o microclima urbano.

Molion (2001) num estudo de séries históricas na Austrália, salientou o fato da expansão urbana crescente interferir em dados meteorológicos já que antigamente as estações meteorológicas ficavam isoladas e hoje muitas estão inseridas em meio urbano e principalmente em locais indevidos, o que afetará consideravelmente o produto final desses dados e análises equivocadas podem ser construídas. Em seu estudo, o autor demonstra claramente o efeito das ilhas urbanas de calor quando em suas análises há um acréscimo da temperatura em área urbana, porém um decréscimo nas áreas rurais.

Todas as cidades apresentaram comportamento de maior correlação das variáveis na estação de chuva e, conseqüentemente, menores valores na estação de estiagem, isso se dá ao fato das diferenças das estações. Na estação de chuva a relação é maior devido à vegetação estar mais vigorosa e potencializar a quantidade de vapor d'água na atmosfera por meio da evapotranspiração, e principalmente devido ao fato de as imagens serem de estações anuais distintas, as quais pertencem ao inverno (estiagem) e verão (chuvosa), portanto a variação de temperatura nessas estações sofre influência da radiação recebida pelo planeta. A variação das estações de inverno e verão acontece devido a inclinação do eixo terrestre em  $23,5^\circ$ , a qual provoca o fenômeno das estações do ano, assim, para o hemisfério sul, quando a Terra encontra-se no afélio (mais distante do sol) e periélio (mais próxima ao sol) a radiação recebida é diferenciada (CHRISTOPHERSON, 2012).

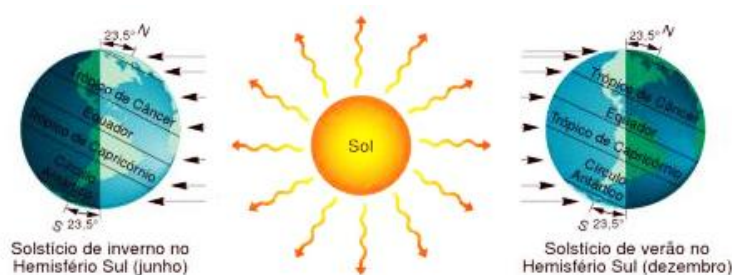


Figura 37 – Efeito da inclinação do eixo terrestre para a radiação recebida nas estações de inverno (afélio) e verão (periélio).

Fonte: CHRISTOPHERSON, 2012

A variação de radiação também implica na diferença dos dados, agora em estação de inverno, os quais apresentam as mais baixas temperaturas e relação irregular com o sequestro de carbono, ou seja, ao contrário do verão, a Terra encontra-se no afélio e devido à inclinação da órbita recebe-se menos radiação para o hemisfério sul nesse período. Este fato desmistifica a ideia de que na estação de estiagem, com a diminuição do sequestro de carbono as temperaturas seriam mais elevadas por ter maiores conteúdos de CO<sub>2</sub> no ar, porém, os principais reguladores da temperatura são a intensidade da radiação recebida nas estações distintas e a diferença na concentração de vapor d'água na atmosfera.

Encontrar formas de tornar as cidades mais frias reduzirá o consumo de energia e o uso de combustíveis fósseis (CHRISTOPHERSON, 2012), recurso limitado no nosso planeta e também reduzirá o efeito de ilhas urbanas de calor. A EPA (*United States Environmental Protection Agency*) criou um programa para a mitigação do fenômeno por meio de vários métodos como o aumento da cobertura vegetal nas cidades, instalação de telhados mais reflexivos, implementação de pavimentos com materiais mais frios e a instalação de telhados verdes<sup>2</sup>, também conhecidos como eco-telhados. A cidade de Stuttgart na Alemanha conta com legislações municipais desde 1989, as quais obrigam prédios com telhado plano a terem telhados verdes (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2009)



Figura 38 – Telhado verde na cidade de Stuttgart, Alemanha.  
Fonte: NATIONAL GEOGRAPHIC, 2009.

<sup>2</sup>Telhados verdes são camadas de vegetação no top dos telhados e podem ser implementados em vários tipos de construção, incluindo instalações industriais, educacionais, governamentais, escritórios, comércio e residências. Esses telhados ajudam na mitigação do fenômeno de ilhas urbanas de calor diminuindo a temperatura por meio do aumento da evapotranspiração (EPA, 2009)

## 6 CONCLUSÃO

A sazonalidade do  $\text{CO}_2\text{flux}$  varia devido à ocorrência ou ausência de precipitação, a qual está diretamente ligada ao vigor da vegetação. As imagens da estação chuvosa (verão) apresentaram os maiores níveis de sequestro de carbono devido à maior capacidade das plantas em exercer atividade fotossintética. Paralelamente a isso, a temperatura variou em função das estações do ano, uma vez que no verão houve um aumento das temperaturas devido às maiores intensidades de radiação recebida pelos alvos e maior concentração de vapor d'água na atmosfera. Já no inverno, houve uma redução da temperatura.

Para a diferenciação dos alvos de mesma cena, as áreas com maior predominância de vegetação apresentaram maiores valores de  $\text{CO}_2\text{flux}$  e menores temperaturas, enquanto que nas cidades observou-se menores níveis de sequestro de carbono e maiores temperaturas estabelecendo uma relação inversa entre essas variáveis, relação essa comprovada por meio do coeficiente de correlação de Kendall.

O fenômeno das ilhas urbanas de calor foi comprovado e, além dos materiais presentes nas grandes metrópoles que armazenam calor, outros fatores e elementos irão contribuir para isso tais como o melhor planejamento das cidades, o conhecimento e conscientização do melhoramento ambiental e de saúde pública por meio de áreas de vegetação, principalmente em localidades estratégicas para o aumento da taxa de sequestro de carbono local.

Assim, sugere-se que novas pesquisas sejam realizadas no sentido de colaborar com a mitigação do fenômeno de ilhas de calor urbanas para testar a eficiência dos telhados verdes como uma possível solução para a problemática da supressão vegetal em grandes centros urbanos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADUAN, R. E.; VILELA, M. F.; REIS JÚNIOR, F. B. **Os Grandes Ciclos Biogeoquímicos do Planeta**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004.
- ARRAU, C. P.; PEÑA, M. A. **Urban Heat Islands**. Disponível em: <<http://www.urbanheatlands.com>>. Acesso em 14 de novembro de 2014.
- ASSIS, W. L. **Os Climas Naturais do Município de Belo Horizonte – MG**. ACTA Geográfica, Boa Vista, Ed. Esp. Climatologia Geográfica, 2012, p. 115-135.
- BARBOSA, R. R. N.; et. al. **Produção e Seqüestro de Carbono na Atmosfera**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer – Goiânia: v.9, N. 16; p. 1783. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013a/agrarias/producao%20e%20sequestro.pdf>>. Acesso em 29 de outubro de 2014.
- BERTOLLINI, W. Z., CARVALHO, V. L. M. **Abordagem da escala espacial no ensino-aprendizagem do relevo**. Terra e Didática, 6(2):58-66. Disponível em: <<http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica>> Acesso em 02 de novembro de 2014.
- BIAS, E. S.; BAPTISTA, G.M.M; LOMBARDO, M. A. **Análise do Fenômeno de Ilhas De Calor Urbanas, por meio da Combinação de Dados Landsat e Ikonos**. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, p. 1741 – 1748.
- CALLEGARI-JACQUES, S.M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003.
- CÂMARA, F. G. **Estatística Não Paramétrica – Testes de Hipóteses e Medidas de Associação**. Departamento de Matemática, Universidade do Açores. Ponta Delgada, Portugal. 2001.
- CAMPOS, J. E. G. **Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para gestão dos recursos hídricos subterrâneos**. Revista Brasileira de Geociências. 34(1): 41-48, março de 2004.
- CHANG, Man Yu. **Seqüestro Florestal de Carbono no Brasil – Dimensões Políticas, Socioeconômicas e Ecológicas**. Tese apresentada ao curso de Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.
- CHOI, Y.-Y.; SUH, M.-S.; PARK, K.-H. **Assessment of Surface Urban Heat Islands over Three Megacities in East Asia Using Land Surface Temperature Data Retrieved from COMS**. *Remote Sens*. 2014, 6, 5852-5867.
- CHRISTOPHERSON, R. **Geossistemas: Uma introdução à geografia física**. Porto Alegre: Editora Bookman, 7ª Edição, 2012.
- CLIMATEMPO. **Belo Horizonte estoura a boca do Pluviômetro**. Notícia publicada em 06 de abril de 2014. Disponível em: <<http://www.climatempo.com.br/noticias/218098/belo-horizonte-estoura-a-boca-do-pluviometro/>>. Acesso em 15 de novembro de 2014.



CODEPLAN 1984. **Atlas do Distrito Federal**. Brasília. Secretaria de Educação e Cultura/CODEPLAN. V.1. 78 p.

COPQUE, A. C. S. M.; SOUZA, F. A.; SANTOS, D. V. C.; PAIXÃO, R. C. **Expansão urbana e redução de áreas verdes na localidade do Cabula VI Região do miolo da cidade do Salvador, Bahia**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.706.

D'AGOSTINO, R. B.; BELANGER, A.; D'AGOSTINO JR, R. **A suggestion for using powerful informative tests of normality**. American Statistical Association – The American Statistician. Novembro de 1990, v. 44, n. 4.

DELUISSI, B. **The Earth's Atmosphere**. *National Oceanic and Atmosphere Administration – NOAA*. Figura Disponível em: <[http://www.esrl.noaa.gov/gmd/outreach/carbon\\_toolkit/basics.html](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/outreach/carbon_toolkit/basics.html)>. Acesso em 30 de outubro de 2014.

DOURADO FILHO, S. **Estudo do comportamento termodinâmico das áreas centrais de negócios de Brasília e Taguatinga, Distrito Federal**. Dissertação de mestrado. Universidade Católica de Brasília, 2004.

DRUMMOND, G. M., et. al. **Biodiversidade em Minas Gerais**. Belo Horizonte: Biodiversitas, 2005. 2ª Edição. Disponível em: <<http://www.biodiversitas.org.br/atlas/flora.pdf>>. Acesso em 14 de novembro de 2014.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Green Roofs**. 2009. Disponível em: <<http://www.epa.gov/heatlands/resources/pdf/GreenRoofsCompendium.pdf>>. Acesso em 01 de dezembro de 2014.

EPIPHANIO, J. **Satélites de Sensoriamento Remoto**. INPE. São José dos Campos. 2002.

FIALHO, E. S. **Ilha de Calor: Reflexões acerca de um conceito**. ACTA Geográfica, Boa Vista: Ed. Esp. Climatologia Geográfica, 2012, PP. 61-76.

FLORENZANO, T. **Iniciação em sensoriamento remoto**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 3ª Edição, 2011.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas dos Remanescentes Florestais**. INPE, 2014. Disponível em<<http://mapas.sosma.org.br/>>. Acesso em 30 de novembro de 2014.

GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J. S. **The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels**. *Oecologia* (1997) 112: 492-501

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Disponível em: <[cidades.ibge.gov.br](http://cidades.ibge.gov.br)>. Acesso em 30 de setembro de 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/english/>>



estatistica/populacao/censo2010/caracteristicas\_da\_populacao/resultados\_do\_universo.pdf>. Acesso em 29 de setembro de 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Síntese de Indicadores Sociais** do IBGE. Disponível em: <FTP://ftp.ibge.gov.br/Indicadores\_Sociais/Sintese\_de\_Indicadores\_Sociais\_2013/pdf/asp\_demograficos\_pdf.pdf> Acesso em: 12 de novembro de 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>. Acesso em 30 de setembro de 2014.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/redeipea/images/pdfs/governanca\_metropolitana/rel1\_1\_ridedef.pdf>

KLINKENBORG, V. **Up to the roof - Green Roofs**. National Geographic Magazine, 2009. Disponível em: <http://ngm.nationalgeographic.com/2009/05/green-roofs/klinkenborg-text>. Acesso em 01 de dezembro de 2014.

LAERA, L. H. N. Arborização urbana e o sequestro de carbono – um potencial mercado a ser explorado na cidade do Rio de Janeiro. Fundação Parques e Jardins; 2-5; 2007.

LARCHER, W. **O balanço de carbono das plantas**. In: LARCHER, W. Ecofisiologia vegetal. São Carlos: RIMA Artes e Textos, 2000. cap.2, p.69-182.

LOMBARDO, M. A.; SILVA FILHO, D. F.; FRUEHALF, A. L.; PAVAN, D. C. **O uso de geotecnologias na análise de ilha de calor, índice de vegetação e uso da terra**. Revista GEONORTE, Edição Especial 2, v. 2, n. 5, p. 520-529, 2012.

MAGALHÃES FILHO, L. C. A. **Ilha de calor urbana, metodologia para mensuração: Belo Horizonte, uma análise exploratória**. Tese de Doutorado. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2006.

MANAHAN, S. E. **Química Ambiental**. Bookman, 2013. 9ª Edição, 944 p.

MARINI, O. J.; FUCK, R. A.; DANNI, J. C. 1981. **A evolução geotectônica da Faixa Brasília e do seu embasamento**. In: SBG, Simp. Sobre o Cráton do São Francisco e Suas Faixas Marginais, 1. Salvador, 1981. Salvador, SBG/BA. P. 100-113.

MARTINS, C. R.; PEREIRA, P. A. P.; LOPES, W. A.; ANDRADE, J. B. **Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: a Importância na Química da Atmosfera**. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, 2003. Disponível em: <http://zeus.qui.ufmg.br/~qgeral/downloads/material/quimica\_da\_atmosfera.pdf>. Acesso em 02 de outubro de 2014.

MARTINS, E.S.M.; REATTO, A.; CARVALHO JR, O. A.; GUIMARÃES, R.F. **Evolução Geomorfológica do Distrito Federal**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.

MENESES, P.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPQ, 2012. Disponível em: <<http://cnpq.br/web/guest/livro-eletronico>> Acesso em 10 de outubro de 2014.

MOLION, L. C. B. **Aquecimento Global: fato ou ficção**. *Ação e Ambiental*, ano IV, n. 18, p. 19-21, 2001.

MORAES, E. C., FIORIO, P. R. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2002. Disponível em: <[http://www.ler.esalq.usp.br/disciplinas/Topo/LEB5838/Peterson/Fundamentos\\_energia\\_pos.pdf](http://www.ler.esalq.usp.br/disciplinas/Topo/LEB5838/Peterson/Fundamentos_energia_pos.pdf)>. Acesso em 11 de dezembro de 2014.

MOREIRA, C. M. **Metodologia para obtenção de dados e informações em logística urbana – estudo de caso da Região Metropolitana de Belo Horizonte**. Curso de Mestrado em Geotécnica e Transportes – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: 2012. Disponível em: <<https://www.ufmg.br/pos/geotrans/images/stories/diss011.pdf>> Acesso em 01 de novembro de 2014.

NORTH AMERICA SPATIAL AGENCY – NASA. **History of Landsat 1**. Disponível em: <[http://landsat.usgs.gov/about\\_landsat1.php](http://landsat.usgs.gov/about_landsat1.php)>. Acesso em 20 de outubro de 2014.

NORTH AMERICA SPATIAL AGENCY – NASA. **Landsat 8 Instruments**. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>>. Acesso em 20 de outubro de 2014.

NOVO, E. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. São Paulo: Editora Blucher, 3ª Edição, 2008.

NOWAK, D. J.; MCPHERSON, E. G.; ROWNTREE, R. A. **Chicago's urban forest ecosystem: results of Chicago urban forest climate project**. USDA Forest Service Gen Tech. Rep. NE-186. 1994.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU, 2014: <[http://www.un.org/en/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects2014.html?utm\\_term=United+Nations,+DESA,+Social,+Economic&utm\\_content=DESA+assists+countries+in+agenda-setting+and+decisionmaking+with+the+goal+of+meeting+their+economic+social+and+environmental+challenges.&utm\\_source=twitterfeed&utm\\_medium=twitter](http://www.un.org/en/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects2014.html?utm_term=United+Nations,+DESA,+Social,+Economic&utm_content=DESA+assists+countries+in+agenda-setting+and+decisionmaking+with+the+goal+of+meeting+their+economic+social+and+environmental+challenges.&utm_source=twitterfeed&utm_medium=twitter)>. Acesso em 21 de novembro de 2014.

PAVIANI, A. **Demandas sociais e ocupação do espaço urbano. O caso de Brasília, DF**. Cadernos Metrópole 21 p. 75-92, 2009.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. Disponível em: <[http://portalbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?evento=portlet&pIdPlc=ecpTaxonomiaMenuPortal&app=estatisticaseindicadores&tax=20381&lang=pt\\_BR&pg=7742&taxp=0&](http://portalbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?evento=portlet&pIdPlc=ecpTaxonomiaMenuPortal&app=estatisticaseindicadores&tax=20381&lang=pt_BR&pg=7742&taxp=0&)>. Acesso em 01 de outubro de 2014.

PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. Disponível em:<<http://www.rio.rj.gov.br/web/riotur/exibeconteudo?id=106717>>. Acesso em 02 de outubro de 2014.

RAHMAN, A. F.; GAMON, J. A.; FUENTES, D. A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H.; **Modeling CO<sub>2</sub> flux of boreal forests using narrow-band indices from aviris imagery**. California State University, Los Angeles, Geography Department, 5151 State Univ. Dr., Los Angles, CA 90032.

ROCHA, E. A.; ABJAUD, T. T. **A metropolização de Belo Horizonte e sua relação com as áreas verdes e o turismo: Parque das Mangabeiras x Parque Sete**. Observatório de Inovação do Turismo – Revista Acadêmica. Rio de Janeiro: Vol. VII, nº 3, 2013.

ROSA, R. S.; MESSIAS, R. A. AMBROZINI, B. **Importância da Compreensão dos Ciclos Biogeoquímicos para o Desenvolvimento Sustentável**. Instituto de Química de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.iqsc.usp.br/iqsc/servidores/docentes/pessoal/mrezende/arquivos/EDUC-AMB-Ciclos-Biogeoquimicos.pdf>>. Acesso em 31 de outubro de 2014.

ROUSE, J. W.; HASS R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS**. Remote Sensing Center, Texas A&M, University, College Station, Texas. Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317, 1973.

STEFFEN, C. **Introdução ao sensoriamento remoto**. INPE. Disponível em: <<http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>>. Acesso em 11 de outubro de 2014.

TERRA-OLIVEIRA, M.; BAPTISTA, G. M. M. **Variações na Modelagem do fluxo de CO<sub>2</sub> na Área Metropolitana de Brasília, por meio de Dados OLI do Landsat 8**. Submetido no Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – 2015.

TEZA, C. T. V.; BAPTISTA, G. M. M. **Identificação do fenômeno de ilhas urbanas de calor por meio de dados ASTER on demand 08 – Kinetic Temperature (III): metrópoles brasileiras**. Anais XII – Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, 16-21, Abril – 2005, INPE, p. 3911-3918.

TROTTER, G. M.; WHITEHEAD, D.; PINKNEY, E. J. **The photochemical reflectance index as a measure of photosynthetic light use efficiency for plants with varying foliar nitrogen contents**. INT. J. Remote Sensing, 2002, vol. 23, no. 6, 1207–1212.

UNITED STATES GEOLOGICAL SERVICE, 2013. Disponível em:<[http://landsat.usgs.gov/about\\_ldcm.php](http://landsat.usgs.gov/about_ldcm.php)> Acesso em 20 de novembro de 2014.

VILARINHO, M. T. L.; GUIRRA, L. S; BAPTISTA, G. M. M. **Avaliação das Bandas 10 e 11 do TIRS do Landsat 8 na Identificação de Ilhas Urbanas de Calor em quatro Cidades Brasileiras**. Submetido no Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – 2015.

WUKELIC, G. E.; GIBBONS, D. E.; MARTUCCI, L. M.; FOOTE, H. P. **Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper Thermal Band.** REMOTE SENS. ENVIRON. 28:339-347 (1989).